

FACULTAD DE CIENCIAS
GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA
TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO ACADÉMICO 2016-2017

TÍTULO:

FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LENTES HOLOGRÁFICAS

AUTOR:

TOMÁS LLORET LÓPEZ



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

*Departamento de Óptica, Farmacología
y Anatomía*



TRABAJO FIN DE GRADO

Fabricación y Evaluación de Lentes Holográficas

Autor: *Tomás Lloret López*

Tutora: *M^a Inmaculada Pascual Villalobos*

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se han estudiado los principios básicos de la holografía y se han aplicado a la obtención de lentes holográficas positivas y negativas. Para ello, se han registrado dichas lentes en dos montajes experimentales distintos, uno simétrico y otro asimétrico. El material de registro holográfico empleado es un fotopolímero medioambientalmente compatible, *Biophotopol*, depositado en capas. La calidad de la imagen de las lentes holográficas fabricadas, se ha evaluado mediante la captura de la PSF. A partir de las PSF's obtenidas, se han calculado las curvas MTF de dichas lentes. Por último, se han evaluado las aberraciones teóricas en el plano de la pupila de salida del holograma, y en el plano focal imagen, comparando dichas aberraciones con la forma de la PSF tridimensional.

Los mejores resultados, se han obtenido para las lentes holográficas asimétricas negativas reconstruidas con el 633 nm.

Palabras clave: Holografía, Lentes Holográficas, Holografía de Volumen, Fotopolímeros, Aberraciones, MTF.

Abstract

In this work, the basic holography principles have been studied and they have been applied in obtaining of positive and negative holographic lenses. For this purpose, these lenses have been registered in two different experimental assemblies, one symmetrical and another one asymmetrical. The holographic recording material used is an environmentally compatible photopolymer, *Biophotopol*, deposited in layers. The image quality of the manufactured holographic lenses has been evaluated by calculating the MTF curves from the PSF images obtained of those lenses. Finally, the theoretical aberrations in the plane of the exit pupil of the hologram and in the image focal plane have been evaluated, comparing those aberrations with the shape of the three-dimensional PSF.

The best results have been obtained for negative asymmetric holographic lenses reconstructed at 633 nm.

Keywords: Holography, Holographic Lenses, Volume Holography, Photopolymers, Aberrations, MTF.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a la Dra. Dña. M^a Inmaculada Pascual Villalobos, tutora de este Trabajo Fin de Grado, y sin cuya ayuda y dedicación no hubiese sido posible.

Mi gratitud al Dr. D. Víctor Navarro Fuster, por su colaboración en este trabajo, y por su constante ayuda en el laboratorio y en el uso del *MATLAB*.

Por último, agradecer al Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, por las facilidades que me han dado y por haberme dado la oportunidad de realizar las *Prácticas externas* y el *Trabajo Fin de Grado* en el Laboratorio de Investigación del Grupo de Holografía y Procesado Óptico.

Alicante, Junio de 2017

Índice general

FUNDAMENTO TEÓRICO

Capítulo 1: Conceptos básicos sobre holografía	1
1.1 Breve historia de la holografía	1
1.2 Aplicaciones de la holografía	5
1.3 El proceso holográfico	6
Capítulo 2: Lentes holográficas	11
2.1 Elementos ópticos holográficos (EOH's)	11
2.2 El concepto de imagen holográfica	13
Capítulo 3: MTF	15
3.1 Definición de la MTF	15
3.2 Obtención de la MTF y frecuencia de Nyquist	16
Capítulo 4: Aberraciones	19
4.1 Aberraciones teóricas en el plano de la pupila de salida	19
4.2 Aberraciones teóricas en el plano focal imagen	21

METODOLOGÍA

Capítulo 5: El material de registro 23

5.1 Material de registro holográfico 23

5.2 Biophotopol 24

Capítulo 6: Montaje experimental 27

6.1 Dispositivo óptico utilizado en la etapa de registro 27

6.2 Registro y reconstrucción de lentes holográficas 29

6.3 Dispositivo óptico utilizado en la reconstrucción 31

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capítulo 7: Evaluación de las lentes holográficas 33

7.1 Evaluación de la MTF 33

7.2 Evaluación de las Aberraciones. 35

CONCLUSIÓN

Capítulo 8: Conclusiones 48

Referencias 49

Anexos 51

Índice de figuras

Figura 1.1	<i>Albert Einstein en 1905 y Theodore Maiman</i>	1
Figura 1.2	<i>Dennis Gabor y el 1º Holograma, año 1948</i>	3
Figura 1.3	<i>Juris Upatnieks y Emmet Leith</i>	4
Figura 1.4	<i>Stephen Benton y Campo cuántico X-3 (Guggenheim)</i>	4
Figura 1.5	<i>Registro de un objeto fuera de eje</i>	8
Figura 1.6	<i>Reconstrucción de un holograma fuera de eje</i>	10
Figura 2.1	<i>Registro y reconstrucción de una LH.</i>	12
Figura 2.2	<i>Registro y reconstrucción de la imagen holográfica</i>	14
Figura 4.1	<i>Esquema geométrico del holograma.</i>	22
Figura 5.1	<i>Fotopolímero depositado (Biophotopol)</i>	26
Figura 5.2	<i>Lentes holográficas registradas en Biophotopol</i>	26
Figura 6.1	<i>Dispositivo óptico utilizado en el registro</i>	28
Figura 6.2	<i>Esquema del registro y la reconstrucción de LH's</i>	30
Figura 6.3	<i>Dispositivo óptico utilizado en la reconstrucción</i>	31
Figura 7.1	<i>Representación de las MTF's de las LR's</i>	33

Figura 7.2 <i>Representación de las MTF's de las LH's</i>	34
Figura 7.3 <i>LH simétrica positiva (rec 633 nm)</i>	39
Figura 7.4 <i>LH simétrica positiva (rec 473 nm)</i>	40
Figura 7.5 <i>LH simétrica negativa (rec 633 nm)</i>	41
Figura 7.6 <i>LH simétrica negativa (rec 473 nm)</i>	42
Figura 7.7 <i>LH asimétrica positiva (rec 633 nm)</i>	43
Figura 7.8 <i>LH asimétrica positiva (rec 473 nm)</i>	44
Figura 7.9 <i>LH asimétrica negativa (rec 633 nm)</i>	45
Figura 7.10 <i>LH asimétrica negativa (rec 473 nm)</i>	46
Anexos	
Fig A2.1 <i>Registro y reconstrucción de un holograma en eje</i>	55
Fig A2.2 <i>Registro y reconstrucción de un holograma fuera de eje</i>	56
Fig A2.3 <i>Registro y reconstrucción por transmisión</i>	57
Fig A2.4 <i>Registro y reconstrucción por reflexión</i>	57
Fig A3.1 <i>Encogimiento</i>	60
Fig A4.1 <i>Aberraciones en el plano imagen "gaussiano"</i>	61
Fig A4.2 <i>Evolución del astigmatismo (633 nm)</i>	62
Fig A4.3 <i>Evolución del astigmatismo (473 nm)</i>	63
Fig A4.4 <i>Evolución del coma</i>	64

Índice de tablas

Tabla 2.1	<i>Términos en la formación de imágenes holográficas.</i>	13
Tabla 5.1	<i>Cantidades de los componentes del material de registro.</i>	25
Tabla 6.1	<i>Tabla resumen de ángulos y distancias</i>	29
Tabla 6.2	<i>Ángulo y distancia de la onda imagen utilizada en cada caso</i>	32

Símbolos y abreviaturas

<i>o:</i>	<i>subíndice que indica haz objeto</i>
<i>r:</i>	<i>subíndice que indica haz de referencia</i>
<i>c:</i>	<i>subíndice que indica haz de reconstrucción</i>
<i>i:</i>	<i>subíndice que indica haz imagen</i>
<i>R:</i>	<i>distancia del punto o/r/c/i al plano del holograma</i>
<i>θ:</i>	<i>ángulo que forma el haz con la normal al holograma</i>
LR:	<i>lente refractiva</i>
LH:	<i>lente holográfica</i>
EOH:	<i>elemento óptico holográfico</i>
PE:	<i>pupila de entrada</i>
PS:	<i>pupila de salida</i>
MTF:	<i>Modulation Transfer Function</i>
PSF:	<i>Point Spread Function</i>
OTF:	<i>Optical Transfer Function</i>

Capítulo 1

Conceptos básicos sobre Holografía

1. Breve historia de la Holografía

Este año, 2017, se cumplen 100 años desde que Albert Einstein¹ estableciese las bases teóricas para el desarrollo de los láseres (la *emisión estimulada*) en su famoso artículo "*The Quantum Theory of Radiation*" [1]. En el año 1953 Charles Townes² produjo, junto a algunos estudiantes, el primer láser de microondas (el *Máser*), aunque este aún no era capaz de lograr una emisión continua de radiación. No obstante, fue Theodore Maiman³, en 1960, el creador del primer láser práctico y operativo [2].

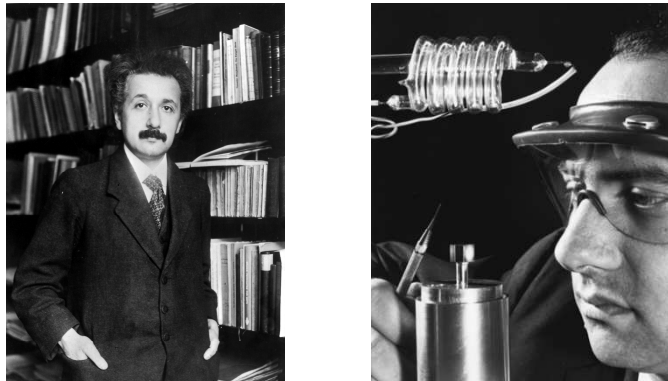


Fig. 1.1 *Albert Einstein en 1905 (izquierda) y Theodore Maiman (derecha) experimentando con el 1º Láser de Rubí. Fuente: Izquierda: Topical Press Agency/Getty Images Derecha: HRL Laboratories, LLC.*

Desde entonces la tecnología ha evolucionado descomunalmente pues, en mayor o menor grado, prácticamente todos los campos científicos y tecnológicos

¹ **Albert Einstein (1879-1955).** Físico teórico alemán de origen judío. Premio Nobel de Física (1921) por sus contribuciones sobre el *Efecto fotoeléctrico*.

² **Charles Townes (1915-2015).** Físico estadounidense galardonado con el Premio Nobel de Física (1964) por sus contribuciones al desarrollo del *máser*.

³ **Theodore Maiman (1927-2007).** Físico norteamericano considerado el creador del primer láser de la historia (el famoso *Láser de Rubí*).

requieren el uso de dispositivos láser. Uno de los campos científicos en los que el láser está más presente, es la Óptica y concretamente tiene especial relevancia en una de sus líneas de investigación más modernas: *La Holografía*.

La *Holografía* nace en el laboratorio de una empresa de ingeniería eléctrica, en el que Dennis Gabor⁴, trabajaba en la mejora del microscopio electrónico [3,4]. Con dicho instrumento se había aumentado en cien veces el poder de resolución de los mejores microscopios ópticos de la época y se estaba muy cerca de resolver las estructuras atómicas, pero los sistemas no eran lo bastante perfectos, pues su limitación estaba relacionada con la aberración esférica de las lentes magnéticas del microscopio. Para resolver este problema, Gabor se preguntó: «¿*Por qué no tomar una mala imagen electrónica, pero que contenga la información ‘total’ de la misma, reconstruirla y corregirla mediante métodos ópticos?*».

La contestación a esta pregunta se le ocurrió mientras esperaba para jugar un partido de tenis el Domingo de Pascua de 1947, y consistía en considerar un proceso en dos etapas, al que llamó "*Reconstrucción del Frente de Onda*" actualmente es conocido como *Proceso Holográfico*. Gabor llamó al interferograma almacenado, *Holograma*, del griego '*holos*', que significa '*la totalidad*', pues contiene la información total (la amplitud y la fase) de la onda objeto. Cabe destacar que en 1947-1948 aún no se había fabricado el primer láser, por lo que para conseguir una fuente de luz coherente y así poder conseguir franjas de interferencia contrastadas, Gabor utilizó una luz proveniente de una lámpara de mercurio con un filtro para luz verde. El objeto que utilizó para fabricar el primer holograma, fue una pequeña diapositiva circular que contenía

⁴ **Dennis Gabor (1900-1979)**. Ingeniero húngaro galardonado con el Premio Nobel de Física (1971) por la invención de la Holografía.

los nombres de tres físicos a los que Gabor consideraba importantes por haber puesto las bases de su técnica. Dichos físicos eran: *Christiaan Huygens*⁵, *Thomas Young*⁶ y *Augustin Fresnel*⁷.

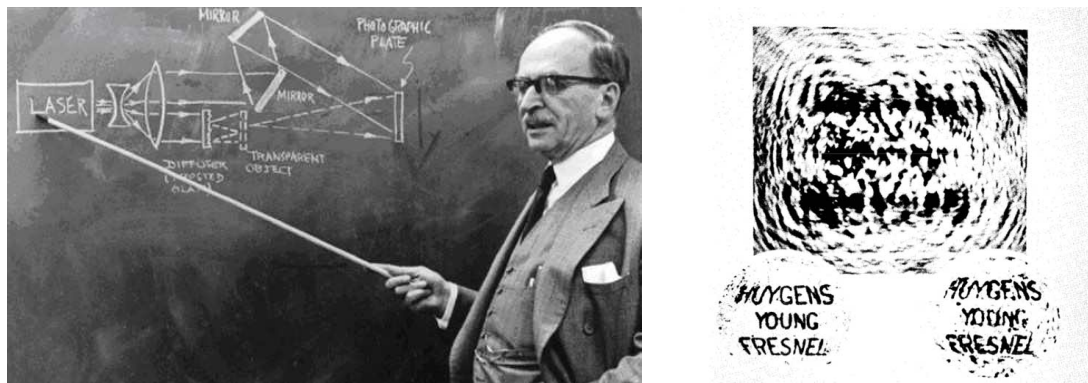


Fig. 1.2 Dennis Gabor explicando el registro de un holograma fuera de eje de un objeto transparente (izquierda), y 1º Holograma y 1ª reconstrucción holográfica, año 1948 (derecha).
Fuente: Izquierda: AIP Emilio Segré Visual Archives, Physics Today Collection. Derecha: "Nobel Lecture" de Gabor.

Tal fue la repercusión de la "*Reconstrucción del frente de onda*", que en 1971 le fue concedido el Premio Nobel de Física. En el discurso de aceptación del premio dijo [2]: "*No necesito escribir una sola ecuación ni mostrar una gráfica abstracta. En la holografía se pueden introducir tantas matemáticas como se desee, por supuesto, pero lo esencial se puede explicar y comprender partiendo de argumentos físicos*".

No obstante, no fue hasta que empezaron a salir los primeros láseres comerciales cuando durante los años 1961 y 1962, los científicos americanos Emmett N. Leith⁸ y Juris Upatnieks⁹ revolucionaron las investigaciones en holografía, solucionando el problema que había tenido Gabor en sus estudios debido a las imágenes dobles [4,5]. Para solucionar dicho problema, Leith y

⁵ **Christiaan Huygens (1629-1695).** Físico, astrónomo y matemático neerlandés.

⁶ **Thomas Young (1773-1829).** Médico y físico inglés. Estableció el principio de *Interferencia* de la luz.

⁷ **Augustin Fresnel (1788-1827).** Físico francés. Contribuyó a la *Teoría ondulatoria de la luz*.

⁸ **Emmett N. Leith (1927-2005)** Físico estadounidense. Hizo varios avances en el campo de la Holografía.

⁹ **Juris Upatnieks.** Físico letón nacionalizado estadounidense. Trabajo con Leith publicando los primeros hologramas tridimensionales, generados mediante un haz de luz láser.

Upatnieks, desarrollaron el primer esquema práctico, empleando un láser, para la obtención de un holograma e idearon la técnica del haz de referencia inclinado. Habían inventado el *Holograma fuera de eje*, también llamado *Holograma de Leith-Upatnieks*.



Fig. 1.3 Juris Upatnieks (izquierda) y Emmett Leith (derecha). **Fuente:** *The Optical Society*.

Uno de los célebres pioneros en holografía, Stephen Benton¹⁰, destacó en más de una ocasión que "*es la intersección de ciencia, arte y tecnología lo que hace la holografía tan interesante*".



Fig. 1.4 Stephen Benton (izquierda) y Campo cuántico X-3 del museo Guggenheim (Bilbao), el cual consiste en dos enormes estructuras revestidas de material holográfico sobre las que se proyectan masivos haces de rayos láser que configuran una vibrante composición (derecha). **Fuente:** Izquierda: *Tribute to Professor Stephen A. Benton, Holography-SPIE's International Technical Group 15* (2004). Derecha: <https://www.guggenheim-bilbao.eus>

¹⁰ **Stephen Benton (1941-2003).** Ingeniero eléctrico americano conocido por ser el inventor del "*Holograma de arco iris*" (también denominado *Holograma Benton*)

2. Aplicaciones de la Holografía

Durante las últimas décadas la holografía ha evolucionado notablemente, pues cada vez son más las aplicaciones en las que la técnica holográfica está presente [4,6,7,8]. Si nos centramos en las aplicaciones más comunes, podemos encontrar: Elementos ópticos holográficos, memorias holográficas, interferometría holográfica, procesamiento óptico de la información, holografía digital, litografía holográfica, hologramas de seguridad... Por otro lado podemos alejarnos del espectro visible, encontrando así hologramas en el espectro electromagnético, en el espectro infrarrojo, en el ultravioleta, en el microondas, y por último en el de rayos X. También se ha desarrollado una holografía acústica, una holografía de electrones y una holografía de neutrones, mediante la cual se pueden obtener imágenes holográficas de átomos a través de neutrones térmicos. Incluso dentro del ámbito de la física teórica la holografía juega un papel crucial, pues una de las conexiones más interesantes de esta con otro campo, es la conexión entre la holografía y la teoría especial de la relatividad, en la que existe un concepto denominado "*Universo holográfico*" que nace del "*Principio holográfico*" descrito por el Dr. Juan Martín Maldacena¹¹ y cuyas ideas están relacionadas con los agujeros negros, la cosmología y la teoría de cuerdas. Por otro lado, también existen numerosas aplicaciones en campos distintos a la física, como son: la medicina (oftalmología, otología, endoscopia y ortopedia), geografía, música, paleontología, arqueología, química, arquitectura, ingeniería (industrial, aeronáutica, naval, de telecomunicación, civil, etc).

¹¹ **Juan Martín Maldacena.** Físico teórico argentino cuya investigación principal se basa en la *Teoría de cuerdas*. Es conocido por ser el descubridor del *Principio Holográfico*.

3. El proceso holográfico

El proceso holográfico, también denominado código holográfico, es la técnica mediante la cual, a través de dos etapas (*registro* y *reconstrucción*), se pueden producir imágenes en tres dimensiones. A diferencia de la técnica fotográfica convencional, en la holografía no se pierde el carácter tridimensional del objeto, ya que se almacena información sobre la amplitud y la fase de la onda, mientras que en la fotografía sólo se almacena información sobre la primera.

Para poder explicar dicha técnica, [9] consideremos una onda plana monocromática de longitud de onda λ y cuya amplitud compleja en un plano $z = 0$, es $U_o(x, y)$. Si de algún modo se pudiera fabricar un elemento óptico de espesor despreciable (denominado transparencia), con transmitancia compleja $t(x, y)$ igual a $U_o(x, y)$, este elemento proporcionaría un registro completo de la onda. La onda podría ser reconstruida simplemente iluminando la transparencia con una onda plana uniforme de amplitud unidad que se propagará en la dirección del eje z .

La onda transmitida por el elemento óptico tendría una amplitud compleja en el plano $z = 0$:

$$U(x, y) = 1 \cdot t(x, y) = U_o(x, y) \quad (1.1)$$

La cuestión radica en cómo fabricar una transparencia de transmitancia $t(x, y)$ igual que la onda original $U_o(x, y)$, ya que uno de los principales problemas es que los detectores ópticos utilizados para fabricar transparencias responden a la intensidad óptica $|U_o(x, y)|^2$, y son insensibles a la fase de la onda, $\arg\{U_o(x, y)\}$. Cabe destacar que la información de la fase es obviamente importante, y no obstante, no puede ser tomada en cuenta debido a que no puede almacenarse.

Para registrar la fase de la onda $U_o(x, y)$ es necesario encontrar un código que transforme la fase en intensidad. La información registrada podría ser decodificada ópticamente para reconstruir la onda original

Etapas de registro del material (*Codificación de la información*):

La *etapa de registro* consiste en "mezclar" la *onda original* U_o (denominada *onda objeto*) que es la que contiene la información del objeto que se desea registrar, con una *onda de referencia* conocida U_R , y registrar su diagrama interferencial en el plano $z = 0$, que es el plano en el que se sitúa el material fotosensible (*Fig 1.5*). La intensidad correspondiente a la suma de las dos ondas se registra fotográficamente de manera que se puede hacer una transparencia (holograma) de la amplitud compleja $t(x, y)$ deseada. El fundamento físico de la *etapa de registro*, es la **interferencia** de la *onda objeto* (en este trabajo, una lente refractiva) y la *onda de referencia* (haz plano).

Si las ondas objeto y referencia, se pueden definir como:

Onda objeto:

$$U_o(x, y) = \sqrt{I_o} \exp [-j\varphi_o(x, y)] \quad (1.2)$$

Onda de referencia (registro):

$$U_r(x, y) = \sqrt{I_r} \exp [-j\varphi_r(x, y)] \quad (1.3)$$

entonces la transmitancia compleja del holograma, t , es proporcional a la intensidad del diagrama interferencial

$$\begin{aligned} t &\propto |U_R + U_o|^2 = |U_R|^2 + |U_o|^2 + U_R^* \cdot U_o + U_R \cdot U_o^* \\ &= I_R + I_o + 2\sqrt{I_R I_o} \cos(\varphi_R - \varphi_o) \end{aligned} \quad (1.4)$$

donde $I_R = |U_R|^2$ e $I_O = |U_O|^2$ son las intensidades de la onda de referencia y de la onda objeto en el plano $z = 0$.

Así pues, la transparencia, que constituye el holograma, tiene información codificada tanto de la amplitud como de la fase de la onda objeto U_O . Como en cualquier diagrama interferencial, la transmitancia t , es muy sensible a la diferencia entre las fases de las dos ondas, φ_O y φ_R .

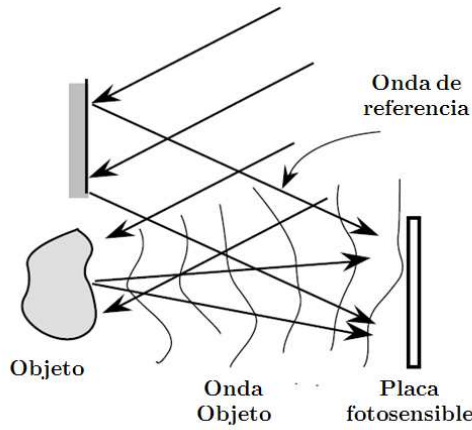


Fig. 1.5 Registro de un objeto fuera de eje. **Fuente:** P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002

Etapas de reconstrucción de la imagen (*Decodificación de la información*):

El objetivo de la segunda parte del proceso holográfico consiste en decodificar la información almacenada en el holograma y así poder reconstruir la onda objeto original. Para ello se utiliza otra vez la onda de referencia U_R . Se ilumina el holograma con dicha onda, y el resultado que emerge del holograma, es una onda de amplitud compleja U_I en el plano del holograma ($z = 0$), denominada *onda imagen*.

$$U_I = tU_R \propto U_R I_R + U_R I_O + I_R U_O + U_R^2 U_O^* \quad (1.5)$$

El fundamento físico de la *etapa de reconstrucción*, es la **difracción** que produce la *onda de reconstrucción* al incidir sobre el holograma, obteniéndose así una *onda imagen* que permite reconstruir el objeto. (*Fig 1.6*).

Relación de términos:

$I_r U_0$: corresponde a la onda objeto original, multiplicada por la intensidad de la onda de referencia. Si I_r es uniforme (independiente de x e y), este término constituye la onda reconstruida deseada.

$U_r^2 U_0^*$: versión conjugada de la onda objeto original modulada por U_r^2 .

$U_r I_r + U_r I_0$: representan la onda de referencia U_r modulada por la suma de las intensidades de las dos ondas $I_r + I_0$.

Si la onda de referencia es una onda plana uniforme propagándose a lo largo del eje z , entonces la onda de referencia en el plano $z = 0$ toma la forma $U_R(x, y) \equiv U_R(x, y, 0) = \sqrt{I_R}$, que es una constante independiente de x e y , por lo que dividiendo la ecuación anterior por $U_R = \sqrt{I_R}$, queda la expresión de la onda reconstruida en el plano del holograma:

$$U(x, y) \propto I_R + I_O(x, y) + \sqrt{I_R} U_O(x, y) + \sqrt{I_R} U_O^*(x, y) \quad (1.6)$$

Normalmente, la onda de referencia y la onda objeto que aparecen en la etapa de reconstrucción, reciben los nombres de *onda de reconstrucción* y *onda imagen*, respectivamente.

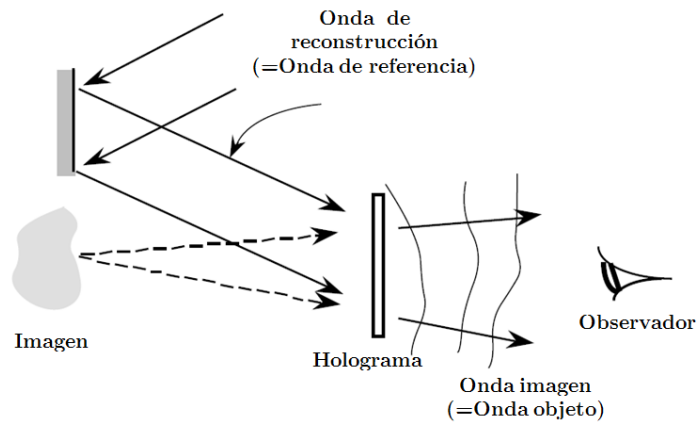


Fig. 1.6 Reconstrucción de un holograma fuera de eje. **Fuente:** P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002

Capítulo 2

Lentes Holográficas

1. Elementos Ópticos Holográficos (EOH's)

Los elementos ópticos holográficos, son elementos ópticos creados a partir del *proceso holográfico* [9,10]. A pesar de que su funcionamiento se basa en el fenómeno de la difracción, pueden simular la función de elementos ópticos convencionales (EOC's) cuyas aplicaciones estén basadas en fenómenos como la *refracción* o la *reflexión*. Esto sería, por ejemplo, fabricando *lentes holográficas* que simularan el funcionamiento de lentes refractivas; o fabricando *espejos holográficos* que simularan la función de espejos convencionales que trabajan por reflexión. Otros elementos ópticos que también pueden ser fabricados, son las redes de difracción cuya función es semejante a la de los prismas.

Algunas ventajas y desventajas de los EOH's respecto a los EOC's son las siguientes [11]:

- La forma física de los EOH's es la capa del material de registro, lo cual permite acoplar el elemento óptico a distintos tipos de soporte, dependiendo de si se requiere una manipulación u otra.
- Se pueden fabricar distintos tipos de EOH's en la misma capa de material de registro, por si se requieren distintas funciones al mismo tiempo, etc.
- Reducido peso y volumen, así como sencilla forma de fabricación.

Los EOH's pueden fabricarse mediante métodos de copia en los cuales, a partir de un elemento original registrado directamente, es posible obtener todas las copias que se requieran. Esto supone una reducción del coste de fabricación, lo cual es una ventaja significativa.

Los EOH's se reconstruyen por difracción y esta depende de la longitud de onda empleada, por lo que presentan aberración cromática.

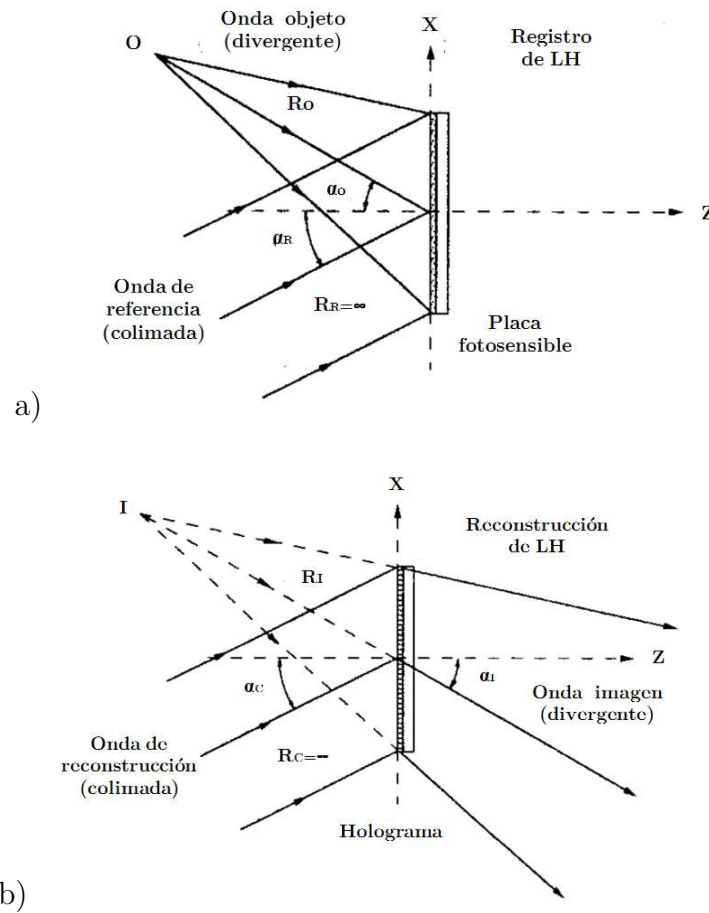


Fig 2.1 a) Registro de una Lente holográfica. b) Reconstrucción de una lente holográfica. Los coeficientes R y α representan las distancias y los ángulos que forman los haces respecto a la normal; y los subíndices O, R, C e I hacen referencia a las ondas objeto, referencia, reconstrucción e imagen, respectivamente. **Fuente:** A. Beléndez, I. Pascual, et al, "Holografía: Conceptos básicos, materiales de registro y aplicaciones", Revista Español de Física 5(2), 1991

Algunas aplicaciones en las que los EOH's han tenido éxito son: lentes holográficas empleadas en concentradores solares, visores adaptados a los cascos de los pilotos de aeronaves, que permiten ver al mismo tiempo los datos de navegación y el medio exterior, acoplados a la entrada y a la salida de una guía de onda [12]

2. El concepto de imagen holográfica

Para explicar el concepto de *imagen holográfica*, se ha de definir previamente el concepto de *imagen* para una lente refractiva convencional. Las lentes refractivas positivas (*convergentes*) forman imágenes reales, mientras que las lentes refractivas negativas (*divergentes*) forman imágenes virtuales. Las lentes holográficas, en cambio, funcionan por difracción y forman imágenes reales y virtuales al mismo tiempo. El funcionamiento de una lente holográfica como positiva o negativa, está ligado a la *etapa de reconstrucción*, y el hecho de que se vea la imagen real o la imagen virtual con mayor rendimiento, depende del haz con el que se realice dicha reconstrucción.

Las relación entre las imágenes, el haz de reconstrucción y la focal de la lente holográfica puede verse en la siguiente tabla resumen:

Posición de la Focal LH	Haz de Reconstrucción	Rendimiento Imagen real	Rendimiento Imagen virtual
<i>Focaliza detrás del holograma</i>	<i>Haz de referencia</i>	<i>Mayor rendimiento</i>	<i>Menor rendimiento</i>
<i>Focaliza detrás del holograma</i>	<i>Haz conjugado</i>	<i>Menor rendimiento</i>	<i>Mayor rendimiento</i>
<i>Focaliza delante del holograma</i>	<i>Haz de referencia</i>	<i>Menor rendimiento</i>	<i>Mayor rendimiento</i>
<i>Focaliza delante del holograma</i>	<i>Haz conjugado</i>	<i>Mayor rendimiento</i>	<i>Menor rendimiento</i>

Tabla 2.1 Relación entre términos en la formación de imágenes holográficas.

El concepto de imagen holográfica[13] suele estar más ligado a la imagen virtual porque la luz no pasa a través del lugar del espacio donde se encuentra la imagen, aunque parece como si se originara en él. Una imagen de este tipo es por ejemplo la que observamos cuando nos miramos en un espejo plano. Sin embargo, si iluminamos un holograma por el lado opuesto, es decir, que las ondas viajen justamente en la misma dirección pero sentido opuesto, podremos ver una imagen real delante del holograma. Esto significa que si el haz de referencia es divergente,

el haz de reconstrucción debe ser convergente. En este caso la luz pasa realmente a través del espacio ocupado por la imagen y puede verse ésta sobre una pantalla.

En la observación de la imagen real se produce un efecto óptico "extraño" debido a que el paralaje está invertido. Al mover la cabeza para intentar ver un lado de la imagen, esta parece moverse en la misma dirección y lo que vemos por tanto, es el lado contrario. En el caso de dos objetos el que estaba más cerca de la placa lo vemos ahora más lejos y viceversa. Estas imágenes se llaman *pseudoscópicas* en contraposición a las *ortoscópicas*, con los efectos de paralaje que observamos habitualmente.

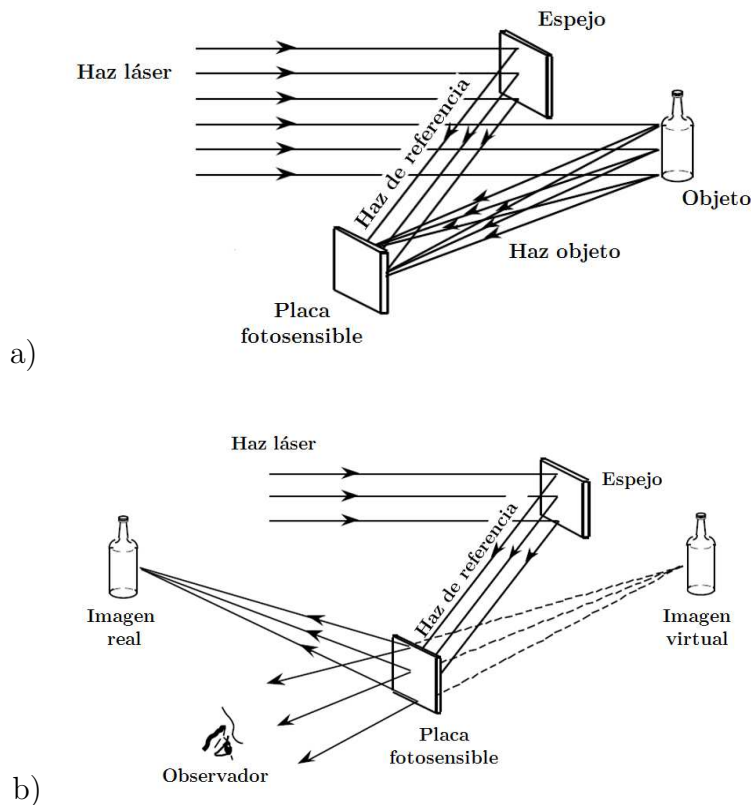


Fig 2.2 Registro y reconstrucción de una imagen holográfica. La imagen virtual y ortoscópica (a) corresponde a la imagen "verdadera", y la imagen real y pseudoscópica (b) a la imagen conjugada. **Fuente:** P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002

Capítulo 3

Modulation Transfer Function (MTF)

El estudio de un EOH viene dado por la aplicación del mismo. Consideremos que dicho elemento es una lente holográfica, así pues, dependiendo de si la lente va a ser utilizada como elemento óptico formador de imagen (*array* de lentes, por ejemplo), o por el contrario, como elemento óptico no formador de imagen (concentradores solares, por ejemplo), se estudiarán unas características u otras. En el presente trabajo, se han estudiado las lentes holográficas fabricadas como elementos ópticos formadores de imágenes y, para ello, se ha estudiado la calidad óptica de la imagen mediante el estudio de la Función de Transferencia de Modulación (MTF) y de las Aberraciones (*Capítulo 4*). En este capítulo nos centraremos en describir los fundamentos teóricos de la MTF.

1. Definición de la MTF

Una de las principales herramientas para la evaluación de la calidad de imagen de una lente es el cálculo de la MTF. La MTF es una medida de la relación del contraste de la imagen respecto al contraste del objeto [14,15,16].

$$MTF = \frac{M_i}{M_o}$$

donde M_i y M_o representan los contrastes imagen y objeto, respectivamente.

A su vez, el Contraste (*Modulation*) puede ser definido como:

$$M = \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}} \quad (3.2)$$

Para un sistema óptico perfecto, es decir libre de aberraciones, en el que únicamente se ha tenido en cuenta el límite impuesto por la difracción según el *Criterio de resolución de Sparrow* y en el que se considera abertura circular, se puede definir la MTF cómo:

$$MTF = \frac{2}{\pi} (\phi - \cos\phi \cdot \sin\phi) \quad (3.3)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot v}{2 \cdot n' \cdot senu'} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot v}{2 \cdot AN'} \right) \quad (3.4)$$

La frecuencia de corte límite (v_0), es decir, la frecuencia para la cual la MTF es igual a cero, viene dada por:

$$v_0 = \frac{2 \cdot AN'}{\lambda} = \frac{1}{\lambda \cdot \left(f/\# \right)} \quad (3.5)$$

donde $f/\#$ es el número de diafragma definido por:

$$f/\# = \frac{f'}{\phi_{PE}} \quad (3.6)$$

siendo ϕ_{PE} el diámetro de la pupila de entrada.

2. Obtención de la MTF y frecuencia de Nyquist

La PSF (*Point Spread Function*), es la función de distribución de intensidad en el plano imagen cuando el objeto es puntual. En los casos en los que el sistema óptico sea perfecto y la pupila sea circular, la imagen vendrá dada por la conocida mancha de difracción de Airy. Sin embargo, en los casos en los que el sistema presente aberraciones, la PSF dependerá de dichas aberraciones.

La transformada de Fourier de la PSF, es la OTF (*Optical Transfer Function*), y el módulo de la OTF es la MTF.

Según Rubiño *et.al* [17,18] la MTF total viene dada en función de la lente y la cámara CCD a través de la siguiente relación:

$$MTF_{total} = MTF_{CCD} MTF_{LH} \quad (3.7)$$

El detector CCD empleado para la captura de las PSF's, está compuesto por 1360 x 1420 píxeles (horizontal x vertical) con una distancia entre centros de 4.65 μm en todas las direcciones. Así pues, entre los fotoelementos de una determinada dirección Δx , la frecuencia de Nyquist viene definida como:

$$\xi_{Ny} = \frac{1}{2\Delta x} \quad (3.8)$$

cuyo valor en nuestro caso es de 107,53 líneas/mm. Esto indica que la cámara CCD Thorlabs DCU224C no es capaz de detectar frecuencias espaciales mayores de 107,53 líneas/mm, por lo que las *MTF's* de las LH's fabricadas (*Capítulo 7*) sólo tienen validez para frecuencias de corte menores a la de Nyquist. Por otro lado, hay que destacar que en realidad las MTF's, de las LH's, representadas tienen implícitas la MTF de la CCD, es decir, lo que en realidad se han representado han sido las MTF's totales, como bien indica la ecuación (3.7).

Capítulo 4

Aberraciones

En este capítulo, se estudiarán los conceptos básicos para el cálculo de las aberraciones, tanto en el plano de salida de la lente holográfica, como en el plano imagen gaussiano (*plano focal imagen*).

1. Aberraciones teóricas en el plano de la pupila de salida (PS)

Para calcular las aberraciones en el plano de la pupila de salida (PS)[19], primero hay que calcular previamente la distancia del holograma a la imagen gaussiana (R_i) y el ángulo imagen (α_i), es decir, el ángulo que forma el punto imagen gaussiano respecto a la normal a un plano $z = 0$ (plano en el que está situado el fotopolímero).

La distancia a la imagen gaussiana viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_c} + \mu \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right) \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{f'} = \mu \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right) \quad (4.2)$$

donde R_r y R_c son las distancias de los haces de referencia y de reconstrucción, respectivamente, y en este caso ambas son infinito. Por otro lado R_o es la distancia objeto, e indica a qué distancia se encuentra el punto objeto del holograma. Cabe destacar que en la fabricación de lentes positivas, R_o es positiva, mientras que en lentes negativas, es negativa. El cálculo de la focal de la LH se puede realizar a través de la ecuación (4.2).

El factor μ indica la relación entre la longitud de onda de reconstrucción y la de registro:

$$\mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o} \quad (4.3)$$

El cálculo del ángulo imagen se hace a través de la siguiente relación:

$$\text{sen}\alpha_i = \text{sen}\alpha_c + \mu(\text{sen}\alpha_o - \text{sen}\alpha_r) \quad (4.4)$$

donde α_o es el ángulo objeto, y α_r y α_c los ángulos de registro y reconstrucción.

La desviación del frente de onda de la esfera gaussiana puede ser escrita como:

$$\Delta = \Delta_S + \Delta_C + \Delta_A \quad (4.5)$$

$$\Delta_S = -\left(\frac{1}{8\lambda_c}\right)(x^2 + y^2)^2 S \quad (4.6)$$

$$\Delta_C = \left(\frac{1}{2\lambda_c}\right)(x^2 + y^2)x C_x \quad (4.7)$$

$$\Delta_A = -\left(\frac{1}{2\lambda_c}\right)x^2 A_x \quad (4.8)$$

donde x e y son las coordenadas en el holograma, S , C_x y A_x los coeficientes de aberración, y los subíndices S , C y A indican aberración esférica, coma y astigmatismo, respectivamente.

Los coeficientes de aberración vienen dados por las siguientes expresiones:

$$S = \frac{1}{R_c^3} - \frac{1}{R_i^3} + \mu\left(\frac{1}{R_o^3} - \frac{1}{R_r^3}\right) \quad (4.9)$$

$$C_x = \frac{\text{sen}\alpha_c}{R_c^2} - \frac{\text{sen}\alpha_i}{R_i^2} + \mu\left(\frac{\text{sen}\alpha_o}{R_o^2} - \frac{\text{sen}\alpha_r}{R_r^2}\right) \quad (4.10)$$

$$A_x = \frac{\sin^2 \alpha_c}{R_c} - \frac{\sin^2 \alpha_i}{R_i} + \mu \left(\frac{\sin^2 \alpha_o}{R_o} - \frac{\sin^2 \alpha_r}{R_r} \right) \quad (4.11)$$

Para el cálculo de las aberraciones en el plano de salida, se ha empleado un script programado en MATLAB (*Anexo 1*).

2. Aberraciones teóricas en el plano focal imagen

De acuerdo con [17,18] la fase de la aberración en el punto (x, y) viene dada por:

$$\Delta(x, y) = \phi_c(x, y) - \phi_i(x, y) \pm [\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)] \quad (4.12)$$

donde el \pm indica los primeros ordenes negativos y positivos de difracción, y ϕ_q es la fase de una onda esférica, donde $q = r, o, c, i$ y denota los puntos referencia, objeto, reconstrucción e imagen, respectivamente. Este valor en el plano del holograma viene dado por:

$$\phi_q(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_q} [r_q(x, y) - R_q] \quad (4.13)$$

La aberración de fase Δ se relaciona con la aberración de onda mediante la siguiente expresión:

$$\Delta = 2 \left(\frac{2\pi}{\lambda_c} \right) W \quad (4.14)$$

Usando las ecuaciones (4.12), (4.13) y con (4.1), (4.3) y (4.4) podemos escribir la aberración de onda como:

$$W = r_c - r_i \pm \mu(r_o - r_r) - [R_c - R_i \pm \mu(R_o - R_r)] \quad (4.15)$$

La intensidad en el plano imagen normal (*Figura 4.1*) al rayo principal (eje Z') a la distancia z' desde el centro de la lente holográfica puede ser escrito como:

$$I(x', y'; z') = \frac{1}{B^2} \left| \iint_S A(x, y) \exp[i\Delta(x, y; x', y'; z')] dx dy \right|^2 \quad (4.16)$$

donde $A(x, y) = 1$ (amplitud uniforme), S representa el área de integración, es decir, el área de la pupila de salida, y B es la amplitud del punto imagen gaussiano ($x' = y' = 0$) en ausencia de aberraciones.

Para el cálculo de las aberraciones en el plano de salida, se ha empleado un script programado en MATLAB, empleando los métodos numéricos indicados por L. Carretero et al [19].

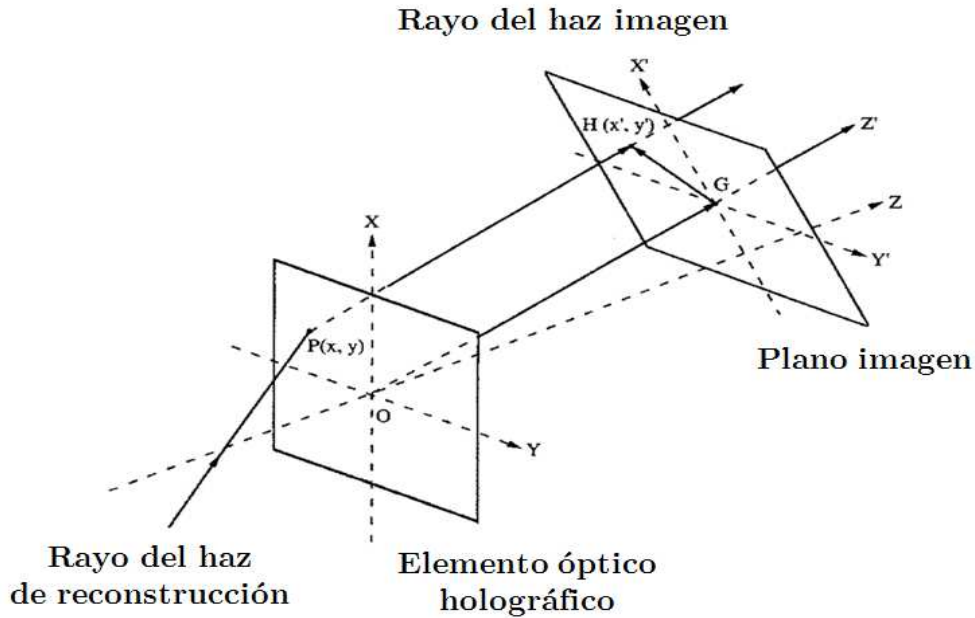


Fig 4.1 Geometría de cálculo entre plano del EOH y plano imagen. **Fuente:** L. Carretero, A. Beléndez et al, "Experimental evaluation of entropy for transmission holographic optical elements", Applied Physics B (Lasers and Optics), 62, 45-50, 1996

Capítulo 5

El material de registro

1. Material de registro

El desarrollo de la Holografía está condicionado por la disponibilidad de un material de registro adecuado a cada aplicación, por lo tanto, una de las principales líneas de investigación es la parte del desarrollo de dicho material de registro. El principal objetivo radica en la invención y posterior desarrollo de un material que sea considerado ideal. La cuestión es: *¿Qué requisitos debe cumplir dicho material para que pueda ser considerado como tal?*

Dichos requisitos son los siguientes [8]:

- Sensibilidad espectral adaptable a las λ de los láseres.
- Alta sensibilidad energética.
- Características de transferencia lineales.
- Alta resolución.
- Bajo ruido.
- Indefinidamente reciclable o relativamente barato.

En la actualidad aún no se ha descubierto ningún material que los cumpla todos a la perfección, se suele seleccionar aquel que mejor se adapta a la aplicación considerada.

Los materiales de registro actuales se clasifican en dos grandes bloques: materiales que provocan un cambio en la amplitud, y materiales que provocan un cambio en la fase. El primer bloque, cambio en la amplitud, en los cuales se producen cambios en el coeficiente de absorción, formado por *materiales fotocrómicos*, y *materiales de emulsión fotográfica*. El segundo bloque, cambio en

la fase, está subdividido en dos grupos: materiales que provocan un cambio en la fase variando el *espesor* en las franjas del patrón interferencial grabado en la etapa de registro del material; y materiales que provocan un cambio en el *índice de refracción* de dichas franjas. El primer grupo está formado por *fotorresinas* y *materiales fototermoplásticos*. En cambio, el segundo grupo está formado por *emulsión fotográfica blanqueada*, *gelatina dicromatada*, *gelatina sensibilizada de haluro de plata*, *fotopolímero* y *fotorrefractivos*.

Los fotopolímeros son materiales cuyos componentes principales son polímeros orgánicos fotosensibles. La formulación básica incluye un colorante que actúa como sensibilizador, un iniciador que genera radicales libres y uno o más monómeros polimerizables. Estos materiales absorben luz cuando se exponen a una determinada longitud de onda que excita al colorante y activa el iniciador. Este último genera radicales libres que reaccionan con el monómero y producen la reacción de polimerización. Las cadenas de polímero generadas en la reacción de polimerización son las responsables de los cambios en las propiedades de estos materiales. El holograma se almacena mediante la variación de dichas propiedades. El mecanismo de la formación del holograma se produce debido a la modulación del índice de refracción entre las zonas polimerizadas y las no polimerizadas, que corresponden a las zonas iluminadas y oscuras, respectivamente, del patrón interferencial almacenado.

2. Biophotopol

El material que se ha utilizado en este trabajo, es un fotopolímero denominado *Biophotopol*. Es un material de registro, cuya mayor ventaja es la alta biocompatibilidad con el medio ambiente, y la escasez de toxicidad [23,24]. Cabe destacar que es un material creado y patentado por el grupo de investigación de Holografía y procesado óptico de la Universidad de Alicante.

El fotopolímero, está formado por una solución de 25 ml, y un disolvente (en este caso agua). La composición es la siguiente: Acrilato sódico (AONa) como monómero polimerizable, Trietanolamina (TEA) como coiniador y plastificante, sal sódica de monofosfato 5'-Riboflavina (RF) como colorante (*absorción en 488 nm*) y polivinilalcohol (PVA) como soporte (Mw=130.000, grado de hidrólisis=87.7%).

Inicialmente se prepara la disolución de los componentes de la *Tabla 5.1* en un agitador magnético convencional en condiciones de laboratorio estándar ($T=22^{\circ}C$ y $Hr=40\%$) y con luz roja, a la cual no es sensible el material.

La disolución de fotopolímero es depositada en láminas de vidrio cuadradas, por gravedad. Una vez depositada la disolución, las láminas se dejan dentro de una incubadora (*Climacell 111*) con humedad y temperatura controladas ($Hr=60\pm5\%$ y $T=20\pm1^{\circ}C$). Cuando una parte del agua se ha evaporado (el tiempo de secado es de, aproximadamente, 24 horas), el espesor "sólido" de la película es de alrededor de 200 μm , y en ese momento ya se puede realizar la *etapa de registro*.

Uno de los parámetros importantes a tener en cuenta, es el espesor de la capa sólida. Para poder determinarlo, se ha usado un medidor de eco de pulso ultrasónico (*Positector 200*). La medida debe ser realizada después de la exposición y reconstrucción, en una zona no expuesta para no estropear el patrón interferencial registrado.

PVA (ml)	TEA (ml)	AONa (ml)	RF (mg)
35	0.35	3.5	20.6

Tabla 5.1 *Cantidades de los componentes del material de registro.*

En la *Figura 5.1* puede verse una imagen de la capa de fotopolímero obtenida.



Fig 5.1 Fotopolímero depositado (*Biophotopol*).

Fuente: Laboratorio Holografía, Universidad de Alicante.

En este trabajo se han registrado lentes holográficas en capas de *Biophotopol* (*Capítulo 6*) fuera de eje (*haz objeto y haz de referencia* simétricos y asimétricos), de transmisión, de fase (mediante la modulación del índice de refracción del material), y de volumen (ver tipos de hologramas en *Anexo 2*).

Una vez registradas las lentes, se han curado con una lámpara LED de 13.5 W (875 lumen a 6500K) durante 20 minutos, eliminando así por completo el colorante residual y aumentando la estabilidad, como puede verse en la *Figura 5.2*

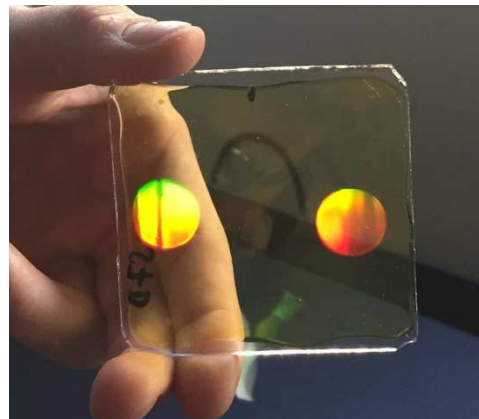
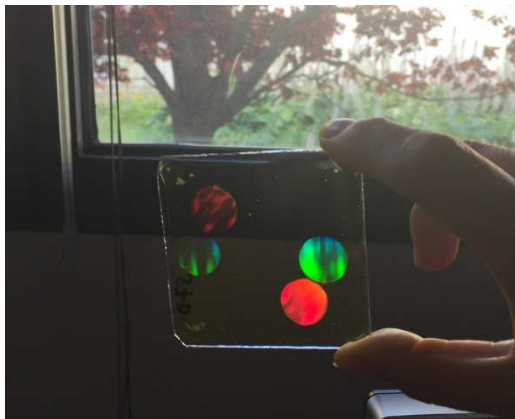


Fig 5.2 Lentes holográficas registradas en el fotopolímero empleado (*Biophotopol*).

Fuente: Laboratorio Holografía, Universidad de Alicante.

Capítulo 6

Montaje experimental

En este capítulo se estudiarán, de manera breve y concisa, los elementos ópticos que conforman los dispositivos utilizados en las diferentes etapas del denominado *proceso holográfico*. También se describirán brevemente los montajes experimentales utilizados para el registro y la reconstrucción de los distintos tipos de lentes holográficas fabricadas.

1. Dispositivo óptico utilizado en las etapa de registro

El esquema del dispositivo experimental utilizado para la fabricación de las lentes holográficas se puede ver en la *Figura 6.1*. Mientras que para la etapa de registro se ha utilizado un láser de Argón que emite a una longitud de onda de 488 nm, para el control (*monitorización*) de la lente fabricada se ha empleado un láser de Helio-Neón sin expandir que emite a una longitud de onda de 633 nm, a la cual no es sensible el material de registro. En la imagen se puede observar como el haz procedente del láser de Argón se divide, mediante una lámina separadora, en dos: los denominados *haz objeto* y *haz de referencia*. Tras ser filtrados espacialmente y colimados, el haz objeto pasa por una segunda lente refractiva (LR), de la que sale un haz convergente. La focal de dicha lente y su distancia a la placa holográfica determinan la focal de la lente holográfica (LH). Tanto el haz objeto como el haz de referencia interfieren en el plano en el que se coloca el fotopolímero. La relación de intensidades entre el haz objeto y el haz de referencia es de 1:1 y la intensidad de registro es de 3 mW/cm².

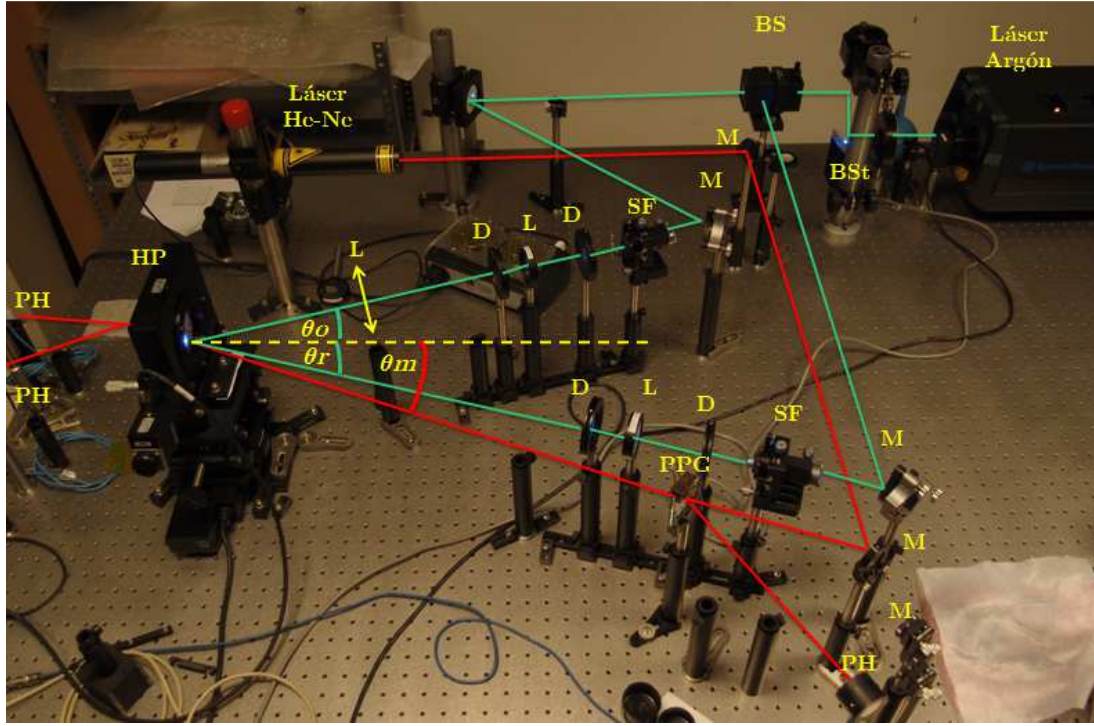


Fig 6.1 Dispositivo experimental utilizado en la etapa de registro (Láser Argón) y Monitorización (Láser Helio-Neón), donde BS ("Beam Splitter" es un divisor de haz), BSt ("Beam Steering" es un set de dos espejos), M ("Mirror" es un espejo), SF ("Spatial Filter" es un filtro espacial), D ("Diaphragm" es un diafragma), L ("Refractive lens" es una lente refractiva), PH ("Photodetector" es un fotodetector), PPG ("Plano Parallel Glass" es una lámina plano-paralela) y HP ("Holographic plate" es la placa holográfica). **Fuente:** Laboratorio Holografía, Universidad de Alicante.

Se han registrado LH's positivas y negativas (*Capítulo 2*), fuera de eje, y de forma simétrica y asimétrica.

La focal de la lente holográfica viene expresada en función de la focal de la lente refractiva, y de la distancia de esta al material de registro:

$$f'_{LH} = f'_{LR} - d_{LR-HP} \quad (6.1)$$

Un resumen de las distancias al material, las distancias focales de las LR's empleadas en el registro, y de las LH's obtenidas, puede verse en la *Tabla 6.1*

Registro fuera de eje	Ángulos	Datos LH (-)	Datos LH (+)
Simétrico	$\theta_{o_{488\text{ nm}}} = 17.1^\circ$ $\theta_{r_{488\text{ nm}}} = -17.1^\circ$ $\theta_{mon_{633\text{ nm}}} = -22.4^\circ$	$d_{LR-HP} = 240\text{ mm}$ $f'_{LR} = 150\text{ mm}$ $f'_{LH} = -90\text{ mm}$	$d_{LR-HP} = 110\text{ mm}$ $f'_{LR} = 200\text{ mm}$ $f'_{LH} = 90\text{ mm}$
Asimétrico	$\theta_{o_{488\text{ nm}}} = 0^\circ$ $\theta_{r_{488\text{ nm}}} = -34.2^\circ$ $\theta_{mon_{633\text{ nm}}} = -46.8^\circ$	$d_{LR-HP} = 240\text{ mm}$ $f'_{LR} = 150\text{ mm}$ $f'_{LH} = -90\text{ mm}$	$d_{LR-HP} = 110\text{ mm}$ $f'_{LR} = 200\text{ mm}$ $f'_{LH} = 90\text{ mm}$

Tabla 6.1 Tabla resumen de ángulos y distancias

Al monitorizar el registro de las lentes holográficas simétricas, el ángulo correspondiente a la longitud de onda 633 nm coincidía con el valor que aparece en la *Tabla 6.1*. Sin embargo, en el caso de las lentes asimétricas, el valor del ángulo de monitorización para el 633 nm era del orden de 45° ; valor que no coincide exactamente con el valor teórico indicado en la *Tabla 6.1*. Esta diferencia es debida a que el material se ha encogido, como consecuencia del registro asimétrico, en el cual el patrón interferencial almacenado no es perpendicular al material de registro (*Anexo 3*).

2. Registro y reconstrucción de lentes holográficas.

En la *Figura 6.2* se puede ver un esquema tanto del registro, como de la reconstrucción de las LH's fabricadas.

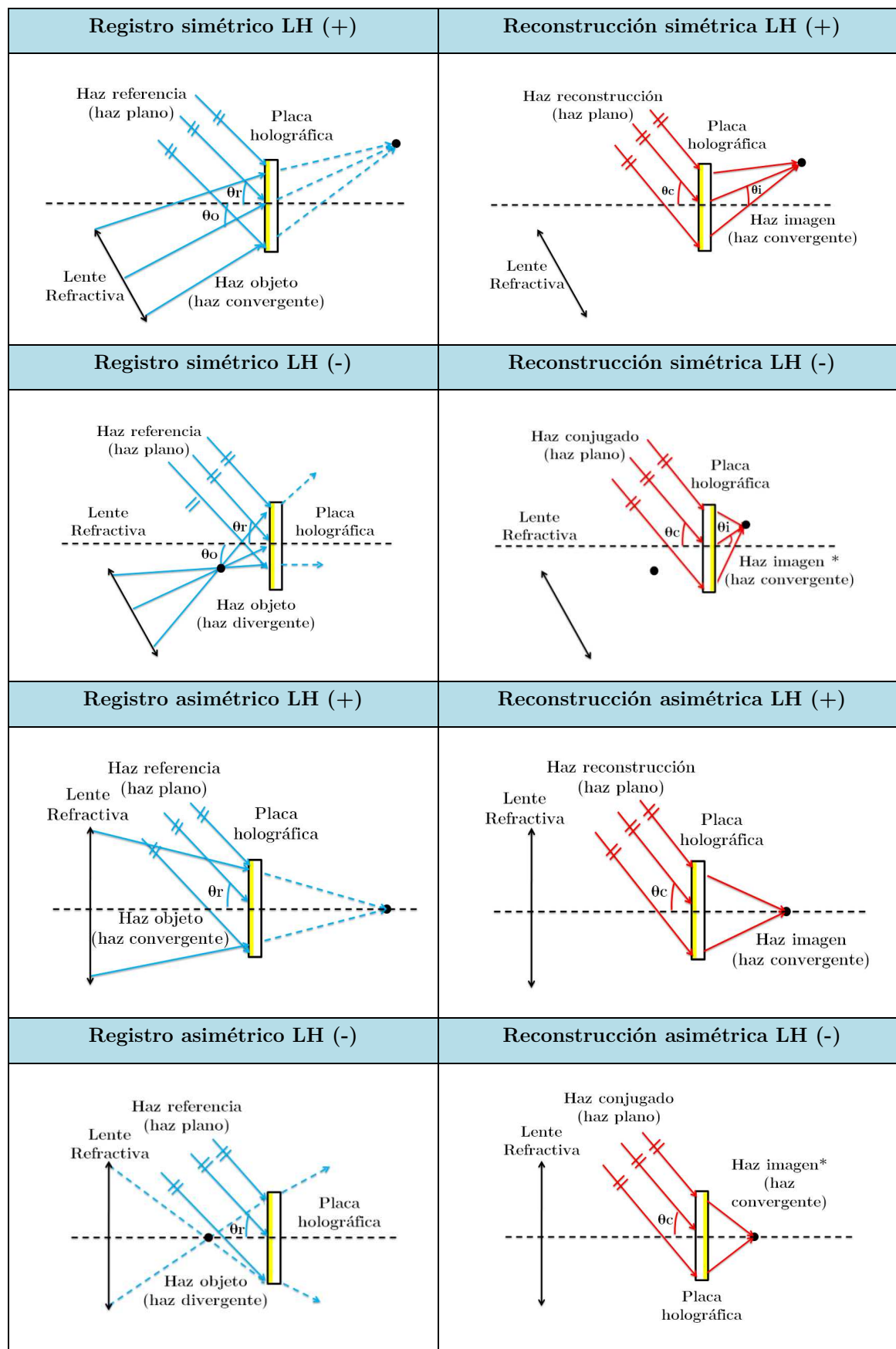


Fig 6.2 Esquema del registro y la reconstrucción de LH's. **Fuente:** Tomás Lloret López.

3. Dispositivo óptico utilizado en la reconstrucción

La reconstrucción de las LH's y la obtención de la PSF, se realiza con un dispositivo experimental que puede verse en la *Figura 6.3*. El haz láser empleado se filtra espacialmente y se coloca incidiendo sobre la placa holográfica (lente holográfica) con un ángulo de reconstrucción θ_c similar al de registro.

La reconstrucción de las LH's se realiza con dos longitudes de onda: 473 nm y 633 nm. La primera es prácticamente idéntica a la longitud de onda de registro (488 nm) y la segunda es totalmente distinta.

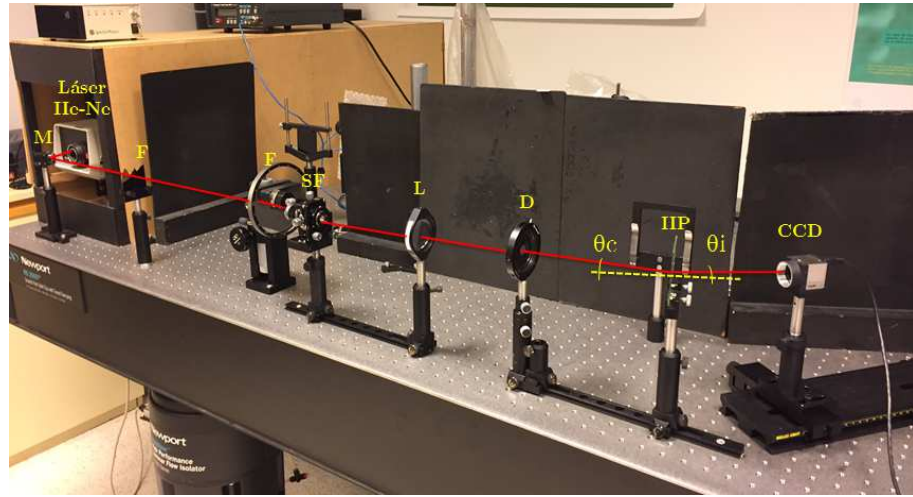


Fig 6.3 Dispositivo experimental utilizado en la Etapa de reconstrucción (Láser 633 nm) y obtención de la PSF con la cámara CCD, donde M ("Mirror" es un espejo), SF ("Spatial Filter" es un filtro espacial), F ("Filter" es un filtro), D ("Diaphragm" es un diafragma), L ("Refractive lens" es una lente refractiva), HP ("Holographic plate" es una placa holográfica), CCD ("Charge Coupled Device" es el sensor) y θ_c y θ_i son los ángulos de reconstrucción e imagen, respectivamente. **Fuente:** Laboratorio Holografía, Universidad de Alicante.

La cámara CCD se sitúa en la posición del punto focal imagen de la lente holográfica fabricada a la distancia R_i y formando un ángulo θ_i según la *Tabla 6.2*.

Tipo de registro	$\lambda_c = 473 \text{ nm}$	$\lambda_c = 633 \text{ nm}$
Simétrico	$\theta_i = 17.1^\circ$ $R_i = 93 \text{ mm}$	$\theta_i = 22.4^\circ$ $R_i = 70 \text{ mm}$
Asimétrico	$\theta_i = 0^\circ$ $R_i = 93 \text{ mm}$	$\theta_i = 0$ $R_i = 70 \text{ mm}$

Tabla 6.2 *Etapa de reconstrucción: ángulo y distancia de la onda imagen utilizada en cada caso.*

Una vez situada la CCD en la posición correcta, se atenúa la cantidad de luz mediante un filtro adecuado y se toma la imagen de la PSF correspondiente a cada lente.

Capítulo 7

Evaluación de las lentes holográficas

La evaluación de las LH's se realiza mediante el estudio de la calidad de la imagen de dichas lentes. Para evaluar la calidad de imagen se dispone de la MTF's y de las aberraciones.

1. Evaluación de la MTF

A partir de la PSF capturada y utilizando las ecuaciones (3.3) a (3.6), se han calculado las MTF's teóricas y experimentales de los distintos tipos de LH's fabricadas, reconstruidas con el 473 nm y con el 633 nm. También se han obtenido las MTF's teóricas y experimentales de las LR's utilizadas en la fabricación de las LH's. En todos los casos se ha utilizado un script programado en MATLAB, el cual ha permitido la representación de las MTF's [16].

MTF's de las LR's

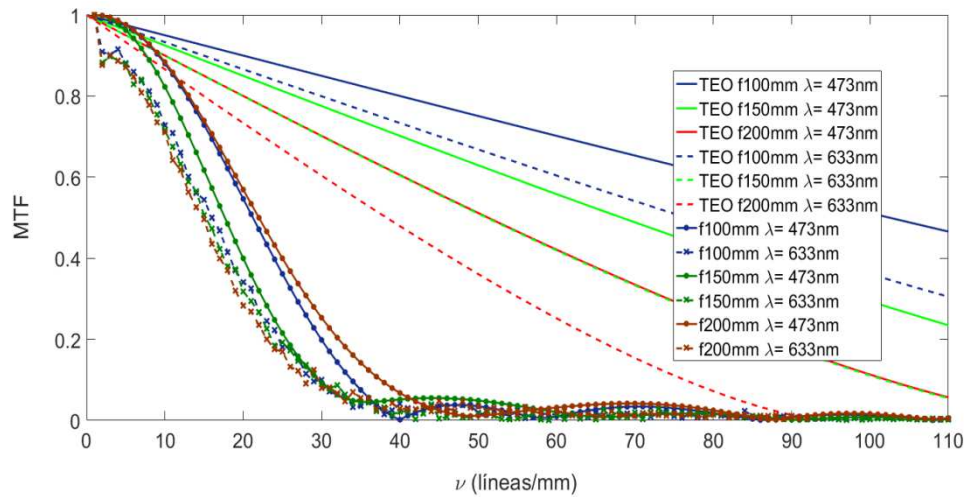


Fig 7.1 Representación de las MTF's de las LR's de distancia focal 100 mm, 150 mm y 200 mm. La frecuencia espacial (eje x) está acotada superiormente por la frecuencia de Nyquist. Para la MTF (eje y) se considerará una cota inferior de 0.1, para poder realizar una correcta estimación de los resultados obtenidos. **Fuente:** MATLAB

En la *Figura 7.1* se han representado las MTF's teóricas y experimentales correspondientes a tres lentes refractivas de 200 mm, 150 mm y 100 mm de distancia focal. Las dos primeras lentes se han empleado en el registro de las LH's y la última se ha incluido porque posee una distancia focal de 100 mm, próxima a la distancia focal de las LH's fabricadas (90 mm); con lo que se podrá establecer una comparación entre las LR's y las LH's de distancia focal similar. Las gráficas de la *Figura 7.1* se han representado en función de la longitud de onda. Se puede observar que las MTF teóricas son siempre mayores que las experimentales, y que los cálculos realizados al utilizar el 473 nm son siempre mayores que al emplear el 633 nm. Cabe destacar que los datos experimentales de las tres lentes consideradas coinciden, para un valor de MTF de 0.1, entre 28 y 30 líneas/mm para el 633 nm.

MTF's de las LH's

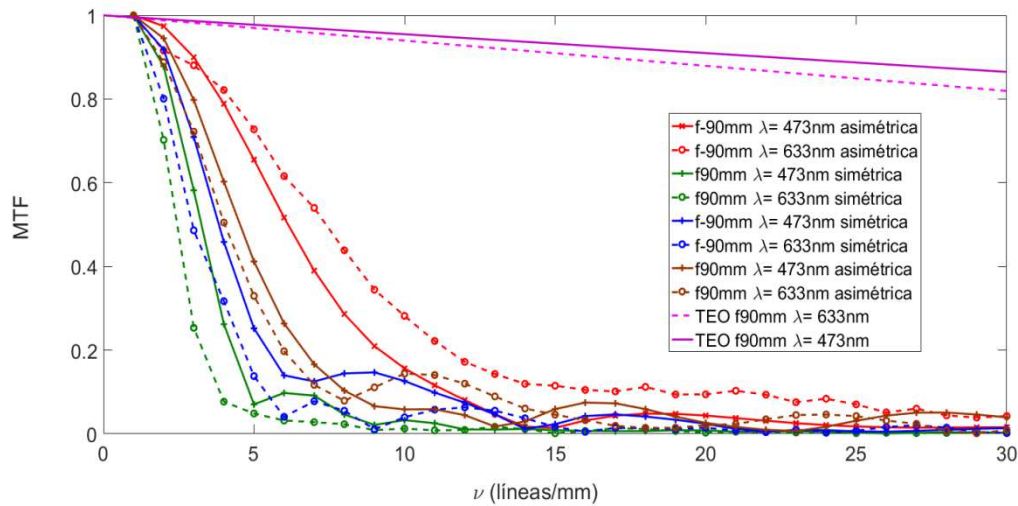


Fig 7.2 Representación de las MTF's de las LH's positivas y negativas, registradas simétricamente y asimétricamente. La frecuencia espacial (eje x) está acotada superiormente por la frecuencia de Nyquist. Para la MTF (eje y) se considerará una cota inferior de 0.1, para poder realizar una correcta estimación de los resultados obtenidos. **Fuente:** MATLAB

Los resultados correspondientes a las LH's pueden verse en la *Figura 7.2*. Se han representado las MTF's teóricas y experimentales de las distintas LH's fabricadas en función de la frecuencia espacial para distintas longitudes de onda de reconstrucción.

Para un valor de MTF de 0.1, las frecuencias son siempre mayores en el caso de las lentes reconstruidas con el 473 nm, excepto para la LH asimétrica negativa que llega a alcanzar una frecuencia mayor para el 633 nm.

Por otro lado, también se puede observar que, el hecho de que el objeto este situado en eje (*caso asimétrico*) o fuera de eje (*caso simétrico*) también afecta a la frecuencia espacial de dichas lentes, siendo esta mayor en el caso asimétrico.

Los valores máximos alcanzados son 17 líneas/mm en el caso de la lente asimétrica negativa reconstruida con 633 nm y 12 líneas/mm si reconstruimos con 473 nm. Al comparar esta LH con la LR de distancia focal similar se tienen los resultados de 30 líneas/mm (633 nm) y 33 líneas/mm (473 nm). Observamos que hay una lógica disminución de la frecuencia espacial que es algo inferior al 50%.

2. Evaluación de las Aberraciones

Como bien se ha descrito en el *Capítulo 4*, en este trabajo se ha hecho un estudio cualitativo (teórico y experimental) de las Aberraciones, tanto en el plano de la pupila de salida (PS), como en el plano focal imagen.

Para el estudio de las aberraciones teóricas en el plano de la pupila de salida, se han utilizado las ecuaciones (4.5) a (4.11) empleando un script programado en MATLAB (*Anexo 1*).

Para el estudio de las aberraciones teóricas en el plano imagen, se ha utilizado la ecuación (4.16). La integral correspondiente a esta ecuación sólo se puede abordar mediante cálculo numérico. Para ello, se supone que la pupila de la lente

es circular de superficie S , y se divide en subdominios de integración. Para la obtención del perfil de intensidades en el plano focal imagen, se ha empleado un script programado en MATLAB correspondiente al método numérico empleado [19].

Para el estudio de las aberraciones de forma experimental en el plano focal imagen, se han utilizado las PSF's capturadas con la CCD (empleadas también para el cálculo de la MTF de las LH's), representando dicho perfil de intensidades de forma tridimensional.

En las figuras 7.3 a 7.10, en el apartado a), se pueden observar las aberraciones totales teóricas en el plano de la pupila de salida de las distintas lentes, y en los apartados b), c) y d), las principales aberraciones que la conforman, esférica, coma y astigmatismo, respectivamente. Se puede apreciar claramente como en los distintos tipos de LH's fabricadas la aberración que predomina es el *coma*. Por otro lado, también se puede ver la dependencia del *astigmatismo* con el montaje experimental empleado para el registro de las LH's. Se puede observar como las LH's registradas de forma simétrica (*objeto fuera de eje*) tienen cierto valor de astigmatismo, siendo este la segunda aberración predominante en ellas; Sin embargo, en las LH's registradas de forma asimétrica (*objeto en eje*) el valor es prácticamente despreciable, predominando más en estas la *aberración esférica*.

Los apartados e), f) y g) representan las imágenes, capturadas con la CCD, de las distribuciones de luz en el plano de "mejor imagen" (*plano focal experimental*). Las imágenes e) son las imágenes obtenidas, tal cual, con la cámara CCD. Las imágenes f) son una ampliación de la PSF, y para su obtención se ha empleado el mismo script de MATLAB en el que se ha obtenido la MTF [16]. Se observa que en las reconstrucciones en las que se ha empleado el láser de Helio-Neón (633 nm), las imágenes suelen ser "menos puntuales", es decir, las aberraciones que se han

generado son mayores, y por lo tanto la imagen (*mancha de luz*) generada es más extensa. Por otro lado, en las reconstrucciones en las que se ha empleado el láser de longitud de onda 473 nm se observa que las imágenes suelen ser más puntuales, lo cual indica, la existencia de una menor aberración y por tanto una mayor calidad de imagen.

En los apartados g) se muestran los distintos perfiles experimentales en el plano imagen "*gaussiano*". Estas figuras muestran perfiles tridimensionales de los apartados e) y f).

Por último, los apartados h) muestran las aberraciones teóricas en el plano imagen gaussiano (plano focal imagen) donde se han representado dichas aberraciones tanto en 2D como en 3D.

Si se hace una comparación cualitativa con los perfiles obtenidos en los apartados h) de todas las lentes reconstruidas, se puede observar que para longitudes de onda cercanas a la de registro, las aberraciones son mínimas, y para longitudes de onda alejadas de la de registro, las aberraciones aumentan. Además sólo se aprecian supuestos "*perfiles gaussianos*" para LH's registradas de forma asimétrica.

Con respecto a las LH's simétricas reconstruidas con la misma longitud de onda (Fig 7.3h y Fig 7.5h, Fig 7.4h y Fig 7.6h), se puede decir que no hay diferencia entre las lentes positivas y negativas, influye más en las aberraciones la longitud de onda de reconstrucción (Fig 7.3h y Fig 7.4h, Fig 7.5h y Fig 7.6h).

En cambio, para las lentes asimétricas, se encuentra que no existen diferencias destacables en cuanto al cambio de longitud de onda de reconstrucción. Sin embargo, sí existen diferencias destacables entre lentes negativas y lentes positivas. Las lentes negativas asimétricas presentan una mancha imagen algo

menor (Fig 7.9f y Fig 7.10 f) que las positivas (Fig 7.7f y Fig 7.8f), y en cuanto a la representación 3D, se aprecia una menor aberración (perfil *mancha de Airy*), por tanto, una mayor calidad de imagen (Fig 7.9h y Fig 7.10h).

Por otro lado, se observa que las LH's que generan mayor cantidad de aberraciones son las LH's registradas de forma simétrica y reconstruidas con el láser de Helio-Neón, por lo que, se ha estudiado, teóricamente, la influencia del diámetro de la *pupila de entrada* (PE) y las aberraciones generadas para este caso, en la *Figura A4.1*. En dicho estudio, se ve claramente que al disminuir el diámetro (las figuras representan las aberraciones en función del radio) a valores mucho más pequeños que el real ($\phi_{real} = 12m$), las aberraciones van desapareciendo, y apareciendo en su lugar, el perfil de intensidades correspondiente a la "*mancha de difracción de Airy*", es decir, al perfil imagen "*gaussiano*".

Dado que las lentes simétricas trabajan fuera de eje ($\theta_i \neq 0$), una de las aberraciones que más se aprecia en el plano imagen, es el astigmatismo como se observa en las *Figuras A4.2 y A4.3* del *Anexo 4*. Las lentes asimétricas, por el contrario, trabajan en eje ($\theta_i = 0$) y se ven afectadas principalmente por coma, como se aprecia en la *Figura A4.4* del *Anexo 4*.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que las LH's fabricadas en Biophotopol presentan mejor calidad de imagen (menor aberración y mayor MTF) cuando se registran de forma asimétrica con geometría negativa y se reconstruyen con una longitud de onda distinta (633 nm) a la de registro (488 nm).

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH SIMÉTRICA POSITIVA (Reconstrucción con 633 nm)

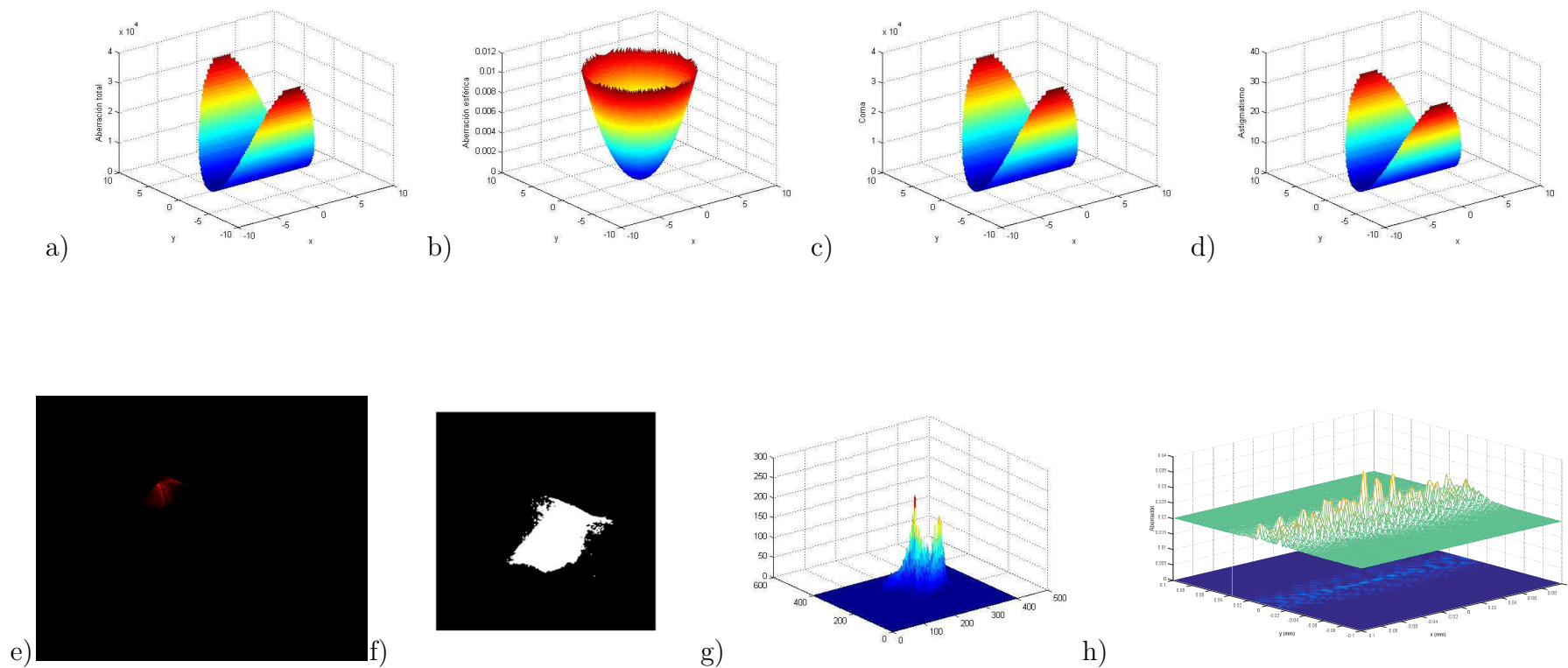


Fig 7.3 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (566x487 píxeles). g) Distribución de luz en el plano de "mejor imagen". h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico.

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH SIMÉTRICA POSITIVA (Reconstrucción con 473 nm)

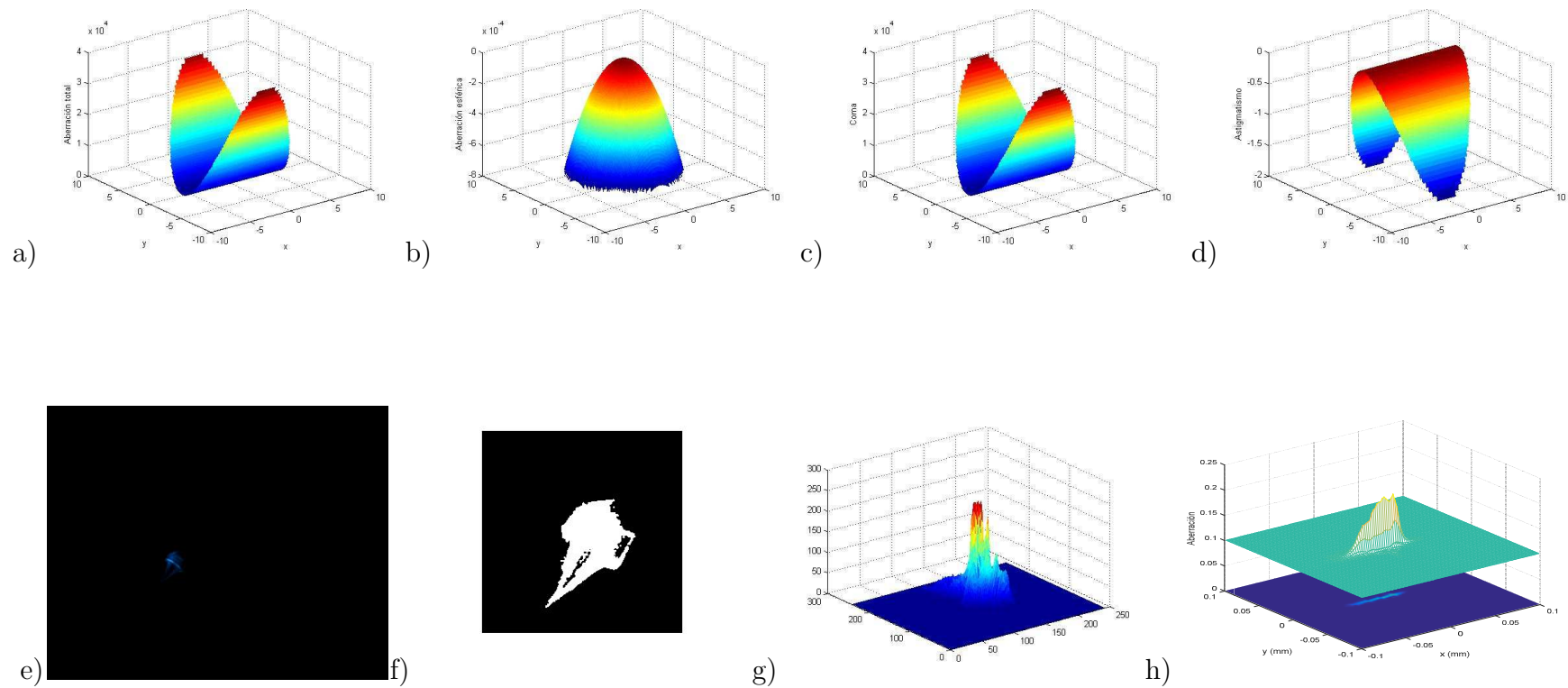


Fig 7.4 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (406x327 píxeles). g) Perfil de intensidades en el plano focal imagen experimental. h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico.

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH SIMÉTRICA NEGATIVA (Reconstrucción con 633 nm)

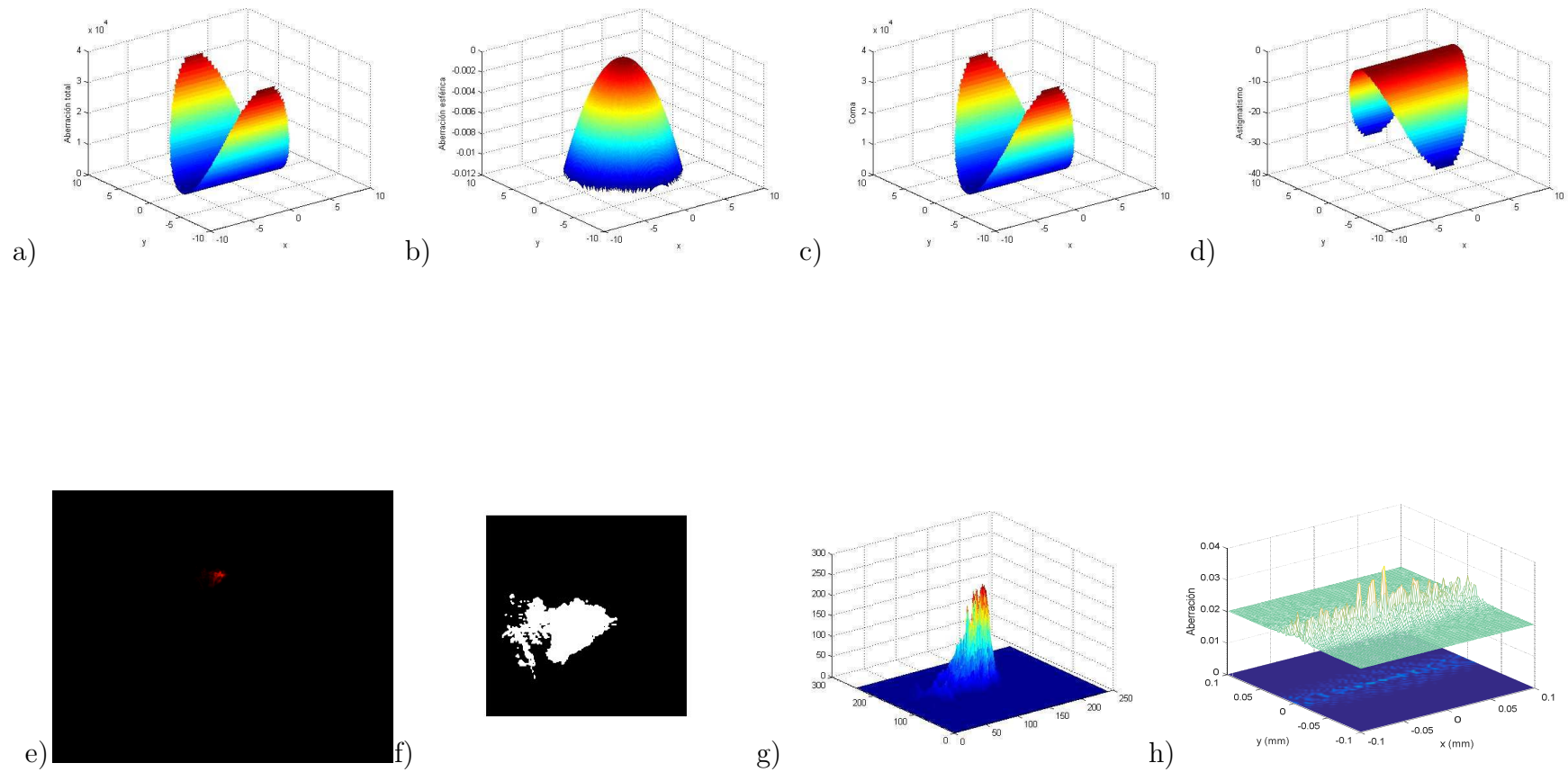


Fig 7.5 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (406x327 píxeles). g) Perfil de intensidades en el plano focal imagen experimental. h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico.

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH SIMÉTRICA NEGATIVA (Reconstrucción con 473 nm)

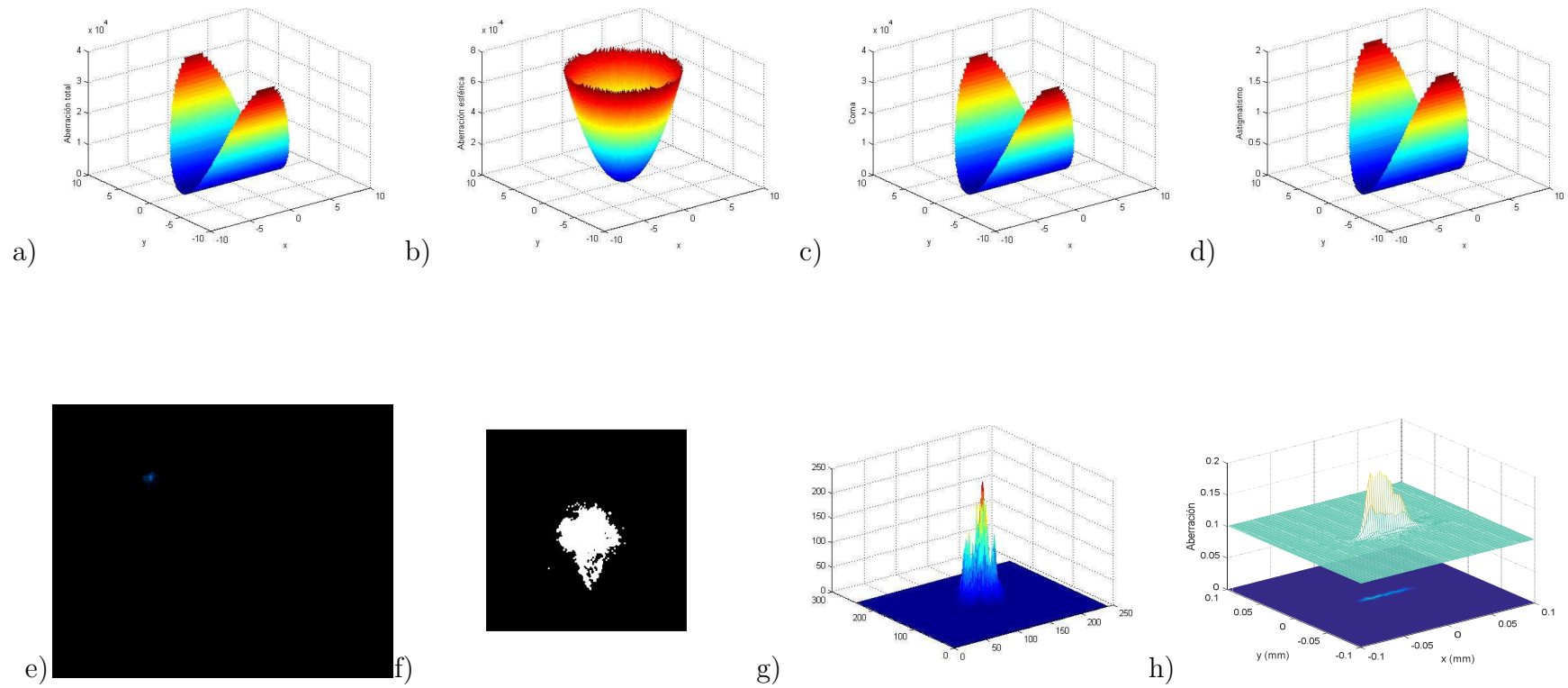


Fig 7.6 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo. e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (406x327 píxeles). g) Perfil de intensidades en el plano focal imagen experimental. h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico.

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH ASIMÉTRICA POSITIVA (Reconstrucción con 633 nm)

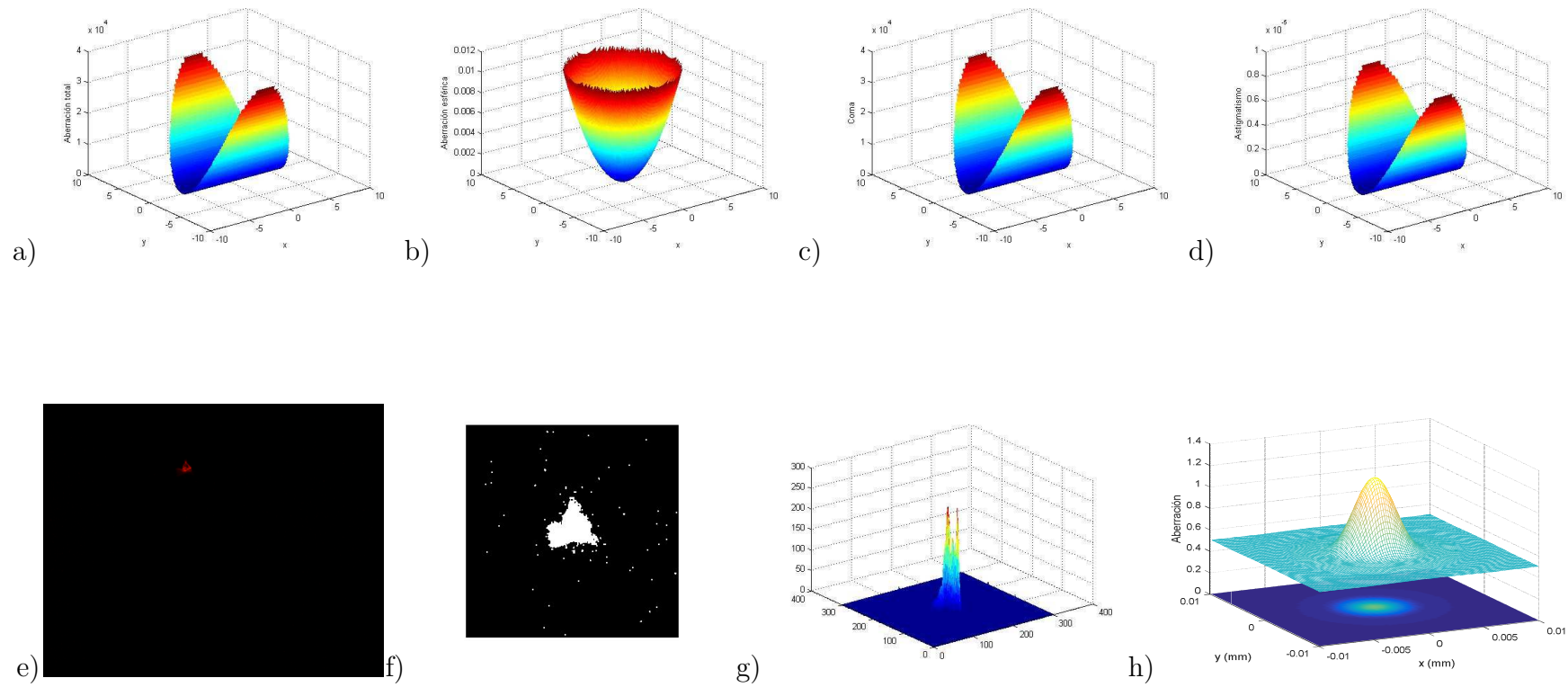


Fig 7.7 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo. e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (466x387 píxeles). g) Perfil de intensidades en el plano focal imagen experimental. h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico.

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH ASIMÉTRICA POSITIVA (Reconstrucción con 473 nm)

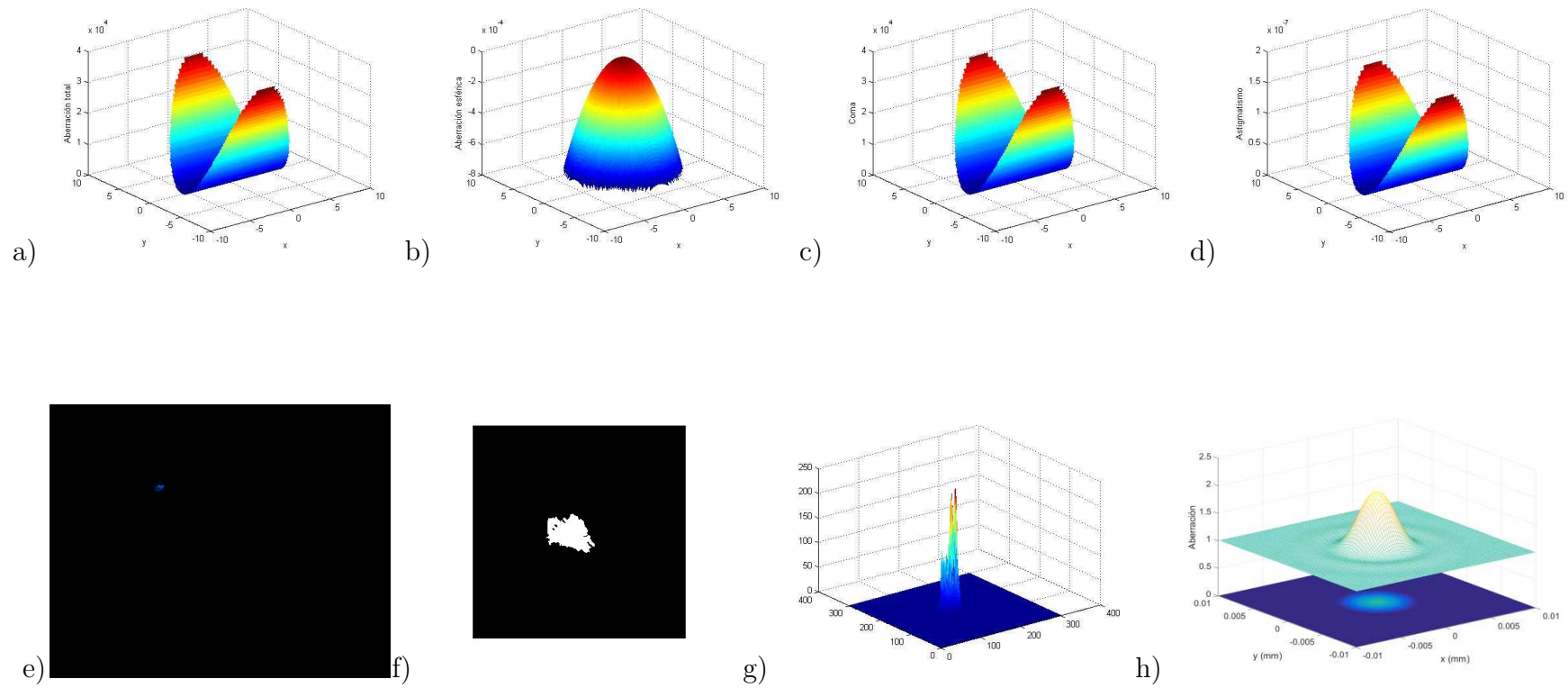


Fig 7.8 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo. e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (466x387 píxeles). g) Perfil de intensidades en el plano focal imagen experimental. h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico.

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH ASIMÉTRICA NEGATIVA (Reconstrucción con 633 nm)

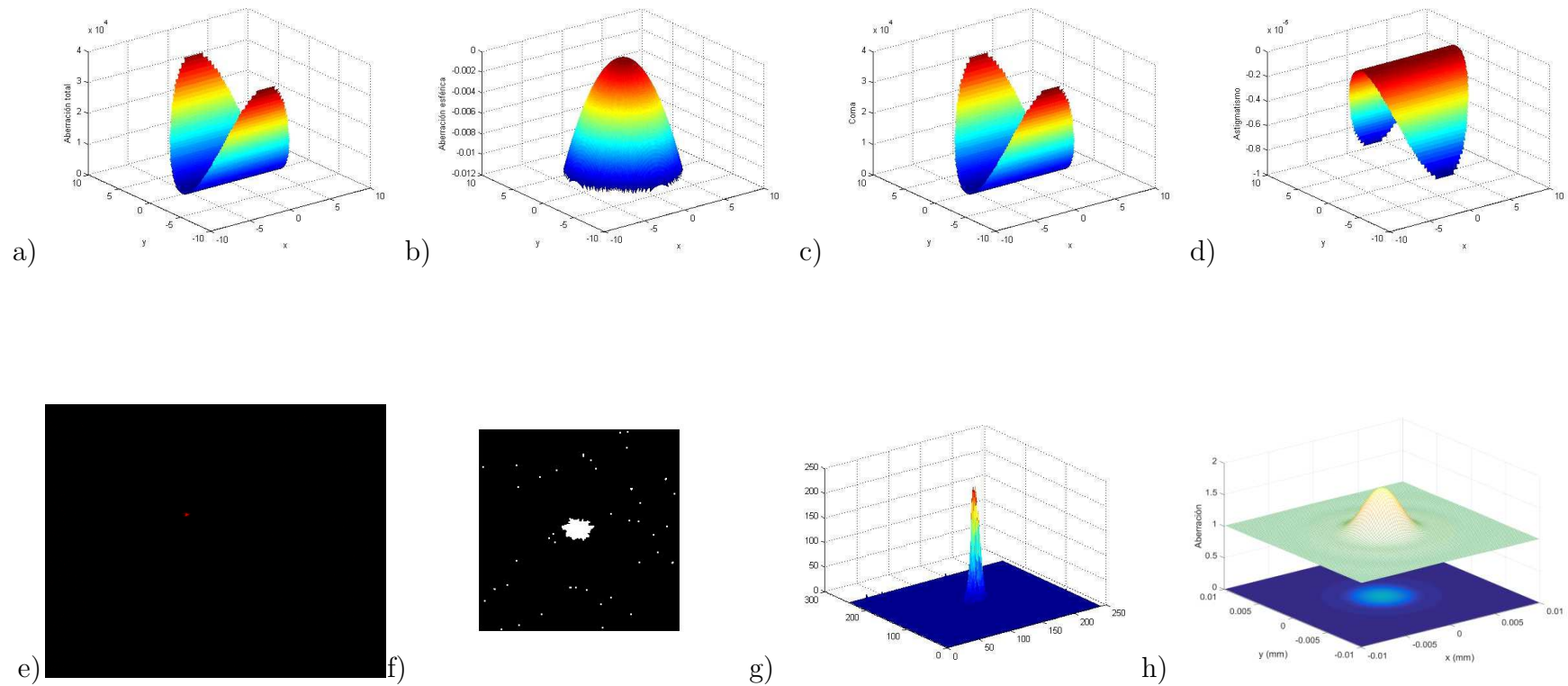


Fig 7.9 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo. e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (406x327 píxeles). g) Perfil de intensidades en el plano focal imagen experimental. h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico.

ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES: LH ASIMÉTRICA NEGATIVA (Reconstrucción con 473 nm)

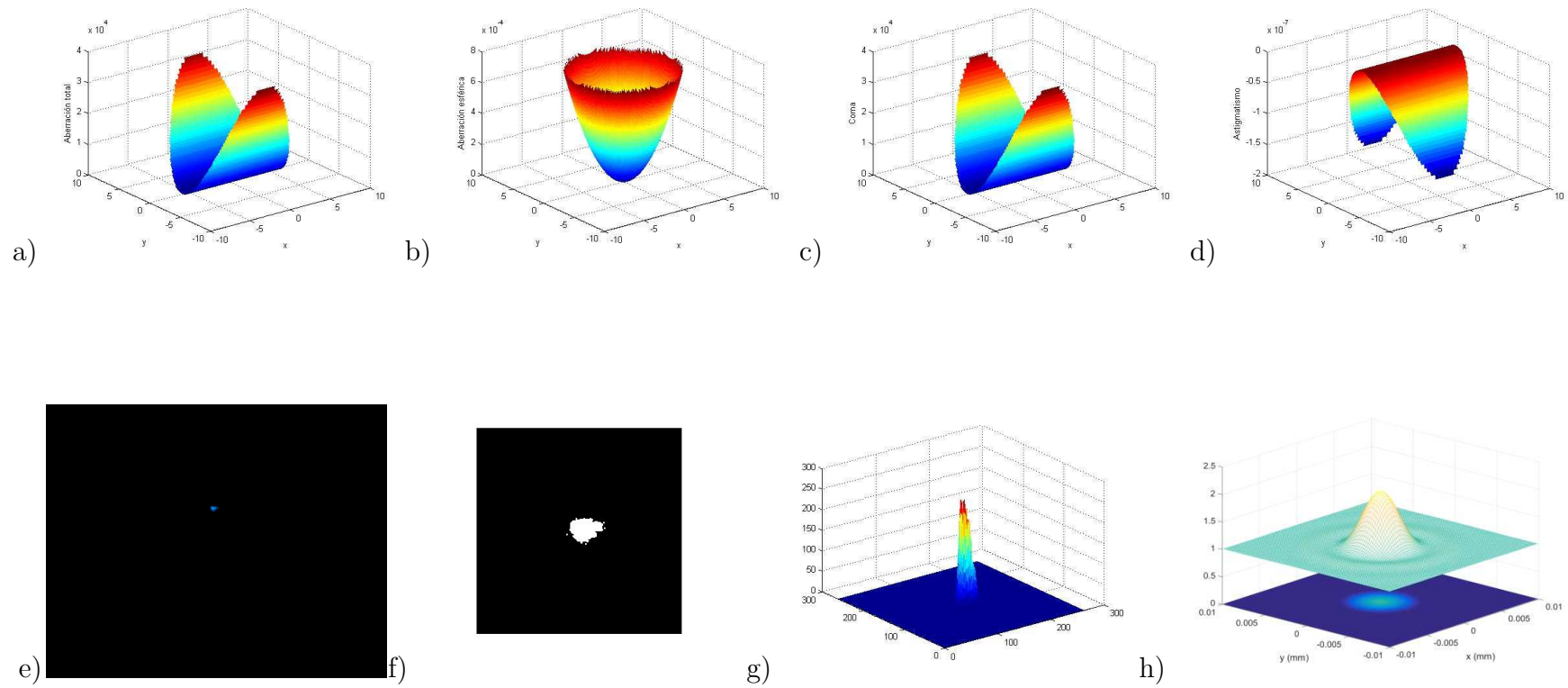


Fig 7.10 a) Aberración total. b) Aberración esférica. c) Coma. d) Astigmatismo. e) PSF capturada con la CCD (1280x1024 píxeles). f) PSF ampliada (426x347 píxeles). g) Perfil de intensidades en el plano focal imagen experimental. h) Perfil de intensidades en el plano focal imagen teórico

Capítulo 8

Conclusiones

Conclusiones obtenidas del trabajo,

- Se han fabricado lentes holográficas, negativas y positivas con registros simétricos y asimétricos, en *Biophotopol*.
- Se han capturado las PSF de las lentes para determinar la MTF y la aberración experimental en el punto focal imagen.
- Se han obtenido las aberraciones teóricas en el plano de la pupila de salida y en el plano focal imagen.
- Se ha evaluado la calidad de imagen de las LH's mediante la MTF. Los mejores resultados para un valor de MTF de 0.1 se obtienen con las LH's registradas de forma asimétrica. Se ha comprobado que apenas hay diferencia entre las reconstruidas con el 633 nm y las reconstruidas con el 473 nm.
- Se ha evaluado la calidad de imagen de las LH's mediante el cálculo teórico del perfil del frente de onda en la pupila de salida y en el punto focal imagen.
- Las LH's que presentan mayor cantidad de aberraciones, son las que se han registrado de forma simétrica, y se han reconstruido con la longitud de onda de 633 nm,.
- Las LH's que presentan menor cantidad de aberraciones, son las que se han registrado de forma asimétrica, y se han reconstruido con una longitud de onda de 473 nm, es decir, "prácticamente" igual a la longitud de onda de registro (488 nm). Excepto para la LH asimétrica negativa que presenta mejor calidad de imagen para el 633 nm.

- Se han encontrado diferencias entre las lentes positivas y negativas asimétricas, siendo estas últimas las que presentan mayor calidad de imagen para las condiciones de reconstrucción utilizadas en este trabajo.

Referencias

- [1]: A. Einstein; "*The Quantum Theory of Radiation*"; Physikalische Zeitschrift **18** 121, 1917
- [2]: Clifford A. Pickover; *The physics book*, 2011
- [3]: D. Gabor; "*A new microscope principle*" ; Nature **161**, 777-778 ; 1948
- [4]: A. Beléndez ; "*Holografía: ciencia, arte y tecnología*"; Revista Brasileira de Ensino de Física; **31**(1), 1602, 2009
- [5]: E. N. Leith y J. Upatnieks. "*Reconstructed wave fronts and communications theory*", J.Opt. Soc. Am. **52**, 1123-1130, 1962.
- [6]: M. Quintanilla, Revista de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza **60**, 57 (2005).
- [7]: E. Downing, *Holographic images: The intersection of art, science, and technology* , Spectrum MIT, 1999
- [8]: L. Wang, S. Kruk *et al*, "*Grayscale transparent metasurface holograms*", Memorandum Optica, **3**(12), 2016
- [9]: P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002
- [10]: Thomas W. Store y Brian J. Thompson, *Holographic and Diffractive Lenses and Mirrors*, Spie Milestone Series, **34**, 1991
- [11]: A. Beléndez, I. Pascual, *et al*, "*Holografía: Conceptos básicos, materiales de registro y aplicaciones*", Revista Español de Física **5**(2), 40-46, 1991
- [12]: S. Lee, B. Lee *et al*, "*Analysis and Implementation of Hologram Lenses for See-Through Head-Mounted Display*", IEEE Photonics Technology Letters, **29**(1), 2017
- [13]: Centro de Holografía de Alicante, *Holografía*, Secretariado de Publicaciones, Universidad de Alicante, 1988
- [14]: Eugene Hecht. *Óptica*. Addison Wesley Iberoamericana. 2000.
- [15]: C. García, J.D. Rodríguez, *et al*, "*Obtención y análisis de lentes holográficas en fotopolímeros*", 5ª Reunión Española de Optoelectrónica, TO-STD
- [16]: J. Rodríguez, *Evaluación de la calidad de imagen de lentes holográficas fabricadas en fotopolímeros*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Alicante, 2006
- [17]: A- Fernández-Oliveras, A.M. Pozo *et al*, "*Comparison of spectacle-lens optical quality by modulation transfer function measurements based on random-dot patterns*", Optical Engineering, **49**(8), 2010
- [18]: A.M. Pozo and M. Rubiño, "*Optical characterization of ophthalmic lenses by means of modulation transfer function determination from laser speckle pattern*", Applied Optics, **44**(36), 2005
- [19]: J.N.Latta, "*Computer-Based Analysis of Hologram Imagery and Aberrations. I. Hologram Types and Their Nonchromatic Aberrations*", Applied Optics, **10**(3)1 1971
- [20]: L.Carretero and A.Fimia, "*Entropy-based study of imaging quality in holographic optical elements*", Optics letters, **19** (17), 1994
- [21]: A. Beléndez, L. Carretero, *et al*, "*Figuras de difracción en lentes holográficas*", Revista Española de Física, **8**(1), 1994

- [22]: L. Carretero, A. Fimia, *et al*, "*The computation and statistical analysis of aberrational diffraction patterns in holographic optical elements*", Journal Optics, **26**(4), 161-174, 1995
- [23]: V. Navarro, M. Ortuño, *et al*, "*Biophotopol's energetic sensitivity improved in 300 μ m layers by tuning the recording wavelenght*", Optical Materials, **52**, 111, 2016
- [24] S. Gallego, A. Márquez *et al*, " Nuevas técnicas de caracterización para fotopolímeros holográficos", XI CNMateriales, Zaragoza, __2010
- [25]: A. Beléndez, I. Pascual *et al*, "*Model for analyzing the effects of processing on recording material in thick holograms*", JOSA A, **9**, 1214-1223, 1992

ANEXO 1:

Script MATLAB para el cálculo de las aberraciones teóricas en el plano de la pupila de salida (PS) de la lente holográfica

```
% Definimos los valores de los ejes cartesianos

x=linspace(-6,6,100);
y=x;

% Definimos los valores de las longitudes de onda de
registro y reconstrucción

lambdareg= 488e-6;
lambdarec= 473e-6;

%Dependiendo de la longitud de onda con la que
reconstruyamos, la AE será positiva o negativa. En 488, la
AE es el plano Z=0

Definimos los valores de las haces objeto (Ro), de
referencia (Rr) y reconstrucción (Rc)

Ro=-90; % Para lentes negativas (-90), y para lentes
positivas (+90)
Rr=Inf;
Rc=Inf;

Definimos los valores de las ángulos objeto (alfa_o), de
referencia (alfa_r) y reconstrucción (alfa_c)

alfa_c=-16.56;
alfa_o=17.1;
alfa_r=-17.1;

%CASO ANULACIÓN ABERRACIONES: Si reconstruimos con la
misma longitud de onda y con el mismo ángulo de registro,
las aberraciones se anulan.
%alfac=-17.1
%lambdarec=488e-6

%Definimos el factor mu
mu=(lambdarec/lambdareg);

%Calculamos la distancia imagen
Ri3=((lambdareg/lambdarec)*(Ro));
```

```

    % Calculamos el ángulo imagen
    alfai1=asind(sind(alfa_c)+((lambdarec/lambdareg)*(sind(alfa_o)-sind(alfa_r))));

    %Cálculo del factor S para la obtención de la Aberración esférica
    S1=(1/Rc^3)-(1/Ri3^3)+((mu)*((1/Ro^3)-(1/Rr^3)));

    %Cálculo del factor C para la obtención del Coma
    Cx1=(sind(alfa_c)/Rc^2)-(sind(alfai1)/Ri3^2)+((mu)*((sind(alfa_o)/Ro^2)-(sind(alfa_r)/Rr^2)));

    %Cálculo del factor A para la obtención del Astigmatismo
    Ax1=((sind(alfa_c))^2/Rc)-((sind(alfai1))^2/Ri3)+((mu)*(((sind(alfa_o))^2)/Ro)-((sind(alfa_r))^2)/Rr));

    nx=size(x,2);
    ny=size(y,2);

    for bucle_x=1:nx %Bucle para encontrar los valores de theta correspondientes a cada punto de rho

        for bucle_y=1:ny

            r=sqrt(x(bucle_x).^2+y(bucle_y).^2);

            if r<=6
                %Cálculo de la aberración esférica total
                delta_esferica(bucle_x,bucle_y)=-
                (1/(8*lambdareg)*(x(bucle_x)^2+y(bucle_y)^2)*S1);
                %Cálculo del coma total

                delta_coma(bucle_x,bucle_y)=((1/(2*lambdareg))*(((x(bucle_x))^2))+((y(bucle_y))^2)*(x(bucle_x)*Cx1));
                %Cálculo del astigmatismo total
                delta_astigmatismo(bucle_x,bucle_y)=-
                ((1/(2*lambdareg))*(((x(bucle_x))^2))*Ax1);
                %Cálculo de la aberración total del frente de ondas

                delta_total(bucle_x,bucle_y)=delta_esferica(bucle_x,bucle_y)+delta_coma(bucle_x,bucle_y)+delta_astigmatismo(bucle_x,bucle_y);

            else% if r>7.5

                delta_esferica(bucle_x,bucle_y)=NaN;
            end
        end
    end

```

```
        delta_coma(bucle_x,bucle_y)=NaN;
        delta_astigmatismo(bucle_x,bucle_y)=NaN;
        delta_total(bucle_x,bucle_y)=NaN;
    end
end
end
```

```
figure('Name','Aberración total')
h = surf(x,y,delta_total);
set(h,'LineStyle','none');
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('Aberración total')
```

```
figure('Name','Aberración esférica')
j=surf(x,y,delta_esferica);
set(j,'LineStyle','none');
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('Aberración esférica')
```

```
figure('Name','Coma')
k=surf(x,y,delta_coma);
set(k,'LineStyle','none');
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('Coma')
```

```
figure('Name','Astigmatismo')
l=surf(x,y,delta_astigmatismo);
set(l,'LineStyle','none');
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('Astigmatismo')
```

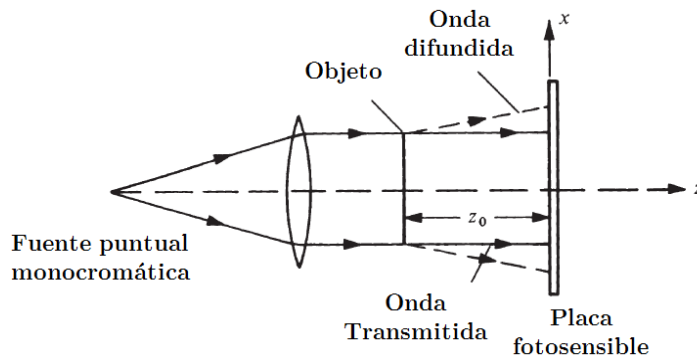

ANEXO 2:

Tipos de hologramas

En función de los distintos parámetros que intervienen en la realización de un holograma, pueden realizarse distintas clasificaciones de estos [11].

Desde un punto de vista geométrico, se puede hablar de **Hologramas en eje** (*Gabor*)(Fig A2.1), en los cuáles las direcciones de los haces objeto y referencia son la misma, y **Hologramas fuera de eje** (*Leith-Upatniecks*)(Fig A2.2), en los que dichas direcciones forman un cierto ángulo.

a)



b)

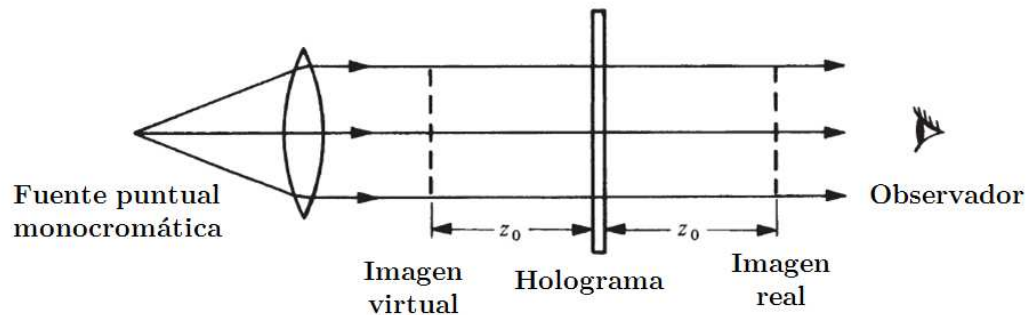
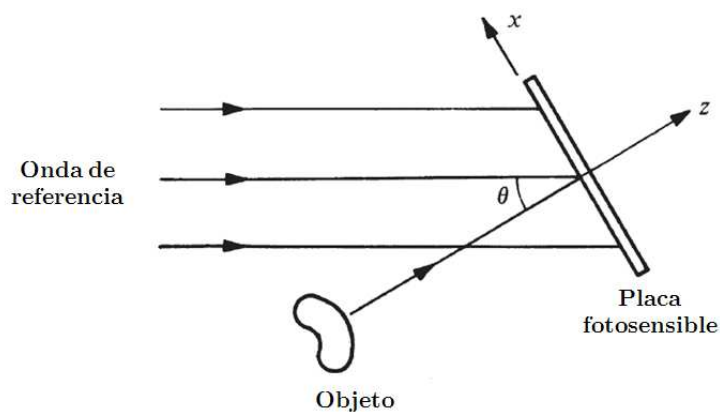


Fig A2.1 Registro (a) y reconstrucción (b) de un Holograma en eje (*Gabor*).

Fuente: P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002

a)



b)

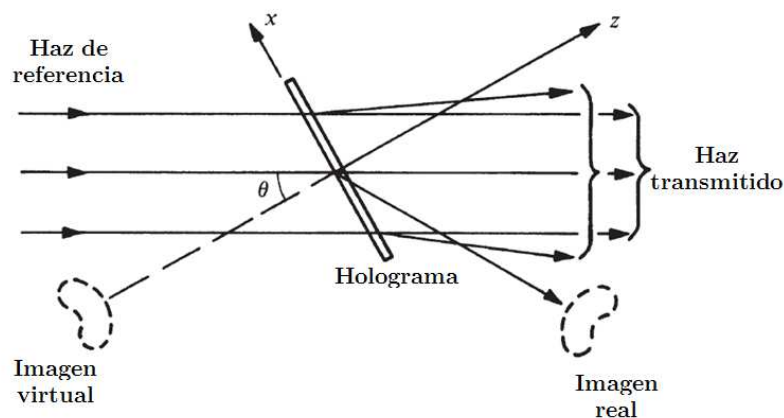


Fig A2.2 Registro (a) y reconstrucción (b) de un Holograma fuera de eje (Leith-Upatnieks).

Fuente: P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002

Si además, consideramos también el sentido de los haces mencionados anteriormente, podemos distinguir entre **Hologramas de transmisión** y **Hologramas de reflexión**. En los primeros, el sentido de ambos haces es el mismo, es decir, ambos inciden sobre la misma cara del material (*Fig A2.3*), mientras que en los segundos, un haz incide sobre una cara y el otro sobre la otra (*Fig A2.4*).

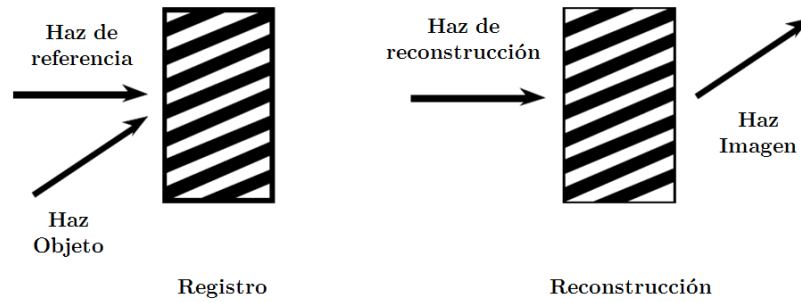


Fig A2.3 Registro y reconstrucción de un Holograma de volumen por transmisión.

Fuente: Augusto Beléndez

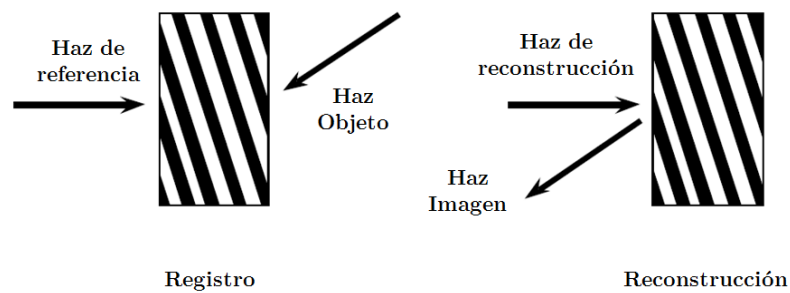


Fig A2.4 Registro y reconstrucción de un Holograma de volumen por reflexión.

Fuente: Augusto Beléndez

Otra posible clasificación, es desde la perspectiva del material de registro. Si el holograma modifica la amplitud de la onda de reconstrucción que incide sobre el mismo mediante la modulación del coeficiente de absorción del material, hablamos de **Hologramas de amplitud**, mientras que si modifica la fase de dicha onda mediante la modulación del índice de refracción o del espesor del material, se denominan **Hologramas de fase**.

Los hologramas también se pueden clasificar según el espesor del medio de registro, y la frecuencia espacial registrada en dicho medio, así pues tendríamos **hologramas delgados**, donde el grosor del holograma es pequeño comparado con la distancia entre franjas, (trabajan según el *Régimen de difracción de Raman-Nath*), y **hologramas de volumen**, donde la distancia entre las franjas es mucho menor que el espesor del medio, (trabajan según el *Régimen de difracción de Bragg*).

La distinción clásica entre estos dos tipos, se hacía a través del parámetro Q [9]:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 d}{n_0 \Lambda^2} \quad (1)$$

donde λ_0 es la longitud de onda de reconstrucción en el aire, d es el espesor del holograma, n_0 es el índice de refracción medio del material y Λ es el periodo de la red almacenada.

Se tenía que: si $Q < 1$ eran *Hologramas delgados*; si $Q > 10$ eran *Hologramas de volumen*; y por último, si $1 < Q < 10$, se dice que trabajamos en *Régimen intermedio*.

Actualmente no se utiliza el factor Q para realizar esta clasificación, sino el factor Q/ν que implica dos parámetros, el factor de volumen Q y la fuerza de la red ν

$$\nu = \frac{\pi n_1 d}{\lambda_0 \cos \theta} \quad (2)$$

donde θ es el ángulo de incidencia del haz de lectura en el interior del medio y n_1 es la modulación del índice de refracción.

Si $Q/\nu > 20$ nos encontramos bajo el "Régimen de Bragg", y si $Q/\nu < 20$ en el "Régimen de Raman-Nath", separando así el estudio de los hologramas de volumen y delgados, respectivamente.

ANEXO 3:

EOH's de volumen. El problema del "encogimiento"

Los hologramas de volumen, tienen la característica de que difractan fuertemente sólo para ángulos cercanos al ángulo de Bragg. El ángulo de Bragg se define como el ángulo para el cual el rendimiento en difracción es máximo, y viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{sen}\theta = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (1)$$

donde: θ es el ángulo de registro o reconstrucción para máximo rendimiento en difracción, λ la longitud de onda del láser empleado para la etapa correspondiente, y Λ el periodo de la red.

Una de las características más importantes de los hologramas de volumen, es que con el tiempo el material de registro puede sufrir alteraciones. Generalmente, puede haber un encogimiento del mismo.

Según aparece en el trabajo de A. Beléndez, *et.al* [25] se puede definir un parámetro T_e/N para determinar las variaciones de espesor:

$$\frac{T_e}{N} = \frac{\text{sen}\alpha_r + \text{sen}\alpha_o}{2\text{sen}\alpha_c + \mu(\text{sen}\alpha_o - \text{sen}\alpha_r)} \quad (2)$$

donde: T_e es el espesor del material de registro, en este caso, un fotopolímero, y $N = n_c/n_r$ representa el índice de refracción efectivo.

Los parámetros α_r , α_o y α_c están definidos en la *Figura 2.1 (Capítulo 2)*.

De la expresión anterior se puede deducir que en el caso en que los haces objeto y de referencia son simétricos respecto a la normal a la muestra $\theta_{\text{objeto}} = -\theta_{\text{referencia}}$, y por lo tanto $T_e/N = 0$, la situación descrita

anteriormente no afecta, ya que las franjas del patrón interferencial grabado en el material son perpendiculares al plano en el que este está situado, por lo que cualquier variación en el espesor se distribuirá de manera uniforme sin afectar a dicho patrón.

Sin embargo, en el caso en el que los *haces objeto y de referencia* son asimétricos respecto a la normal, ocurre todo lo contrario. En este caso $T_e/N \neq 0$, y [9] el patrón interferencial grabado durante la etapa de registro, forma un cierto ángulo ψ con el plano en el que está situado el material, y esto hace que los cambios generados en el espesor de dicho material, pueden dar lugar a una rotación de las franjas almacenadas en el medio así como a un cambio en su espaciado, debiendo modificarse la geometría de reconstrucción y/o la longitud de onda para que se pueda cumplir la condición de Bragg durante la reconstrucción.

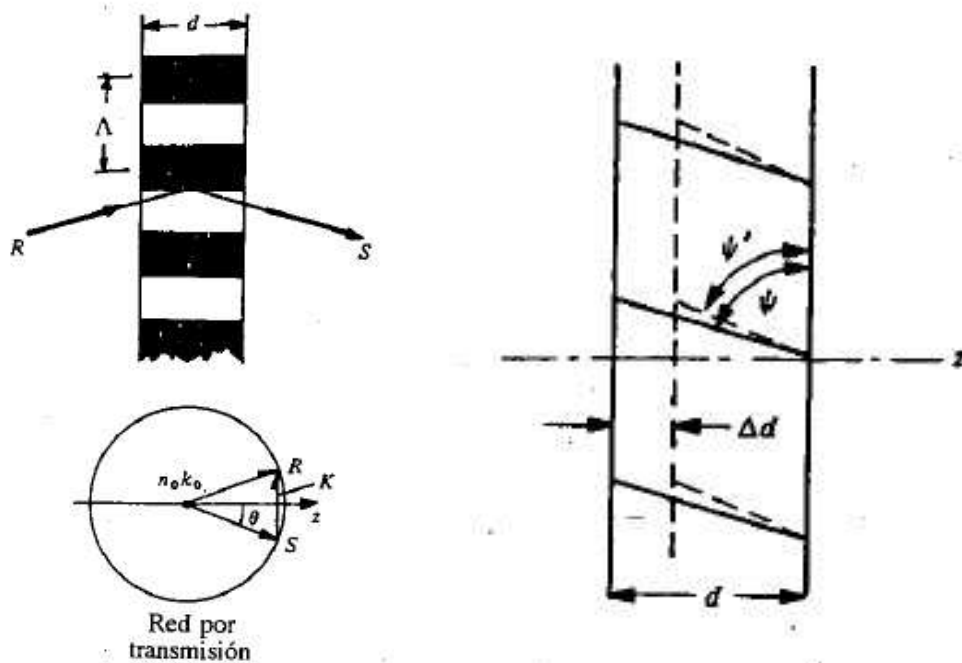


Fig A3.1 Caso simétrico (izquierda) y Caso asimétrico (derecha). **Fuente:** P. Hariharan, Basics of Holography, Cambridge University Press, 2002

ANEXO 4:

Imágenes de aberraciones en las LH's estudiadas

ESTUDIO TEÓRICO DE LAS ABERRACIONES EN EL PLANO IMAGEN GAUSSIANO

LH SIMÉTRICA POSITIVA (Reconstrucción con 633 nm)

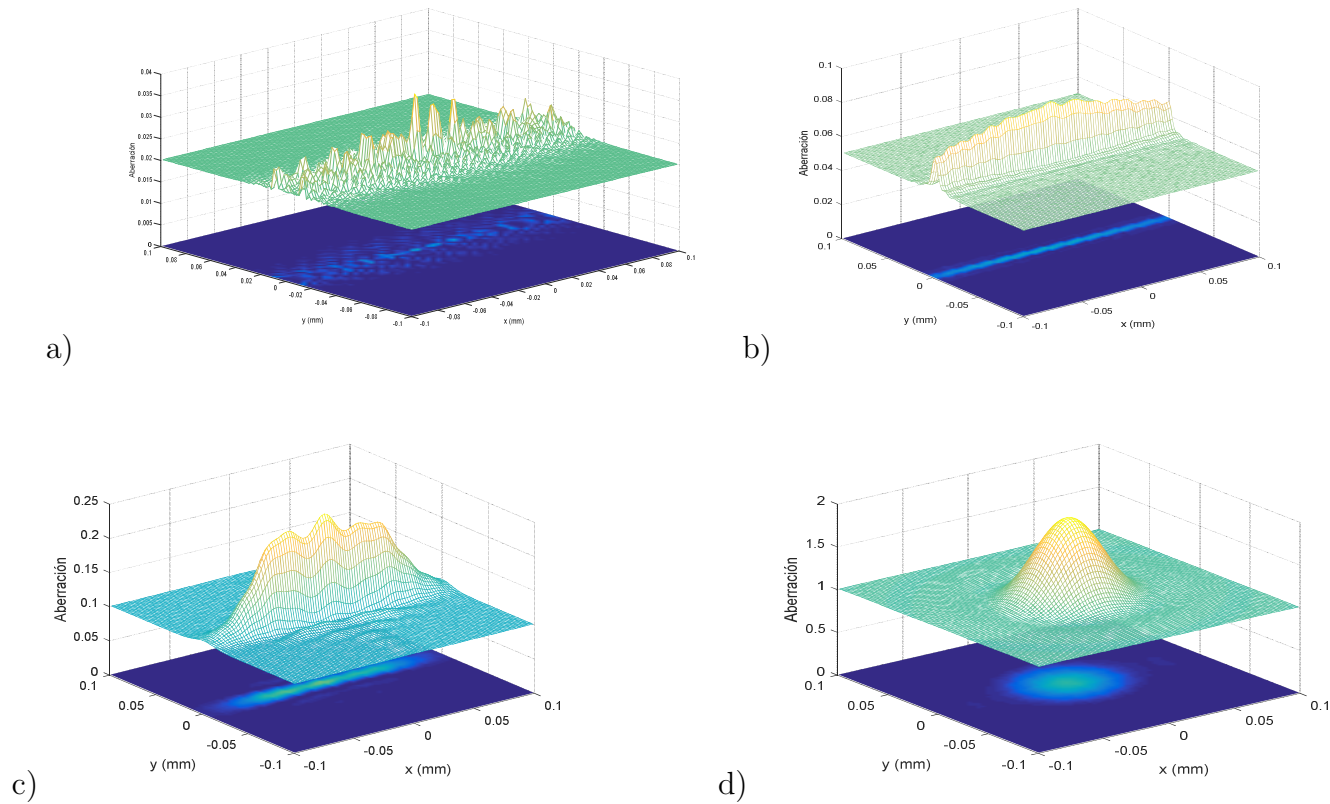


Fig A4.1 a) Radio=6 mm b) Radio=3 mm c) Radio=1,5 mm d) Radio=0,5 mm

EVOLUCIÓN DEL ASTIGMATISMO: LH **SIMÉTRICA NEGATIVA** (Reconstrucción con 633 nm)

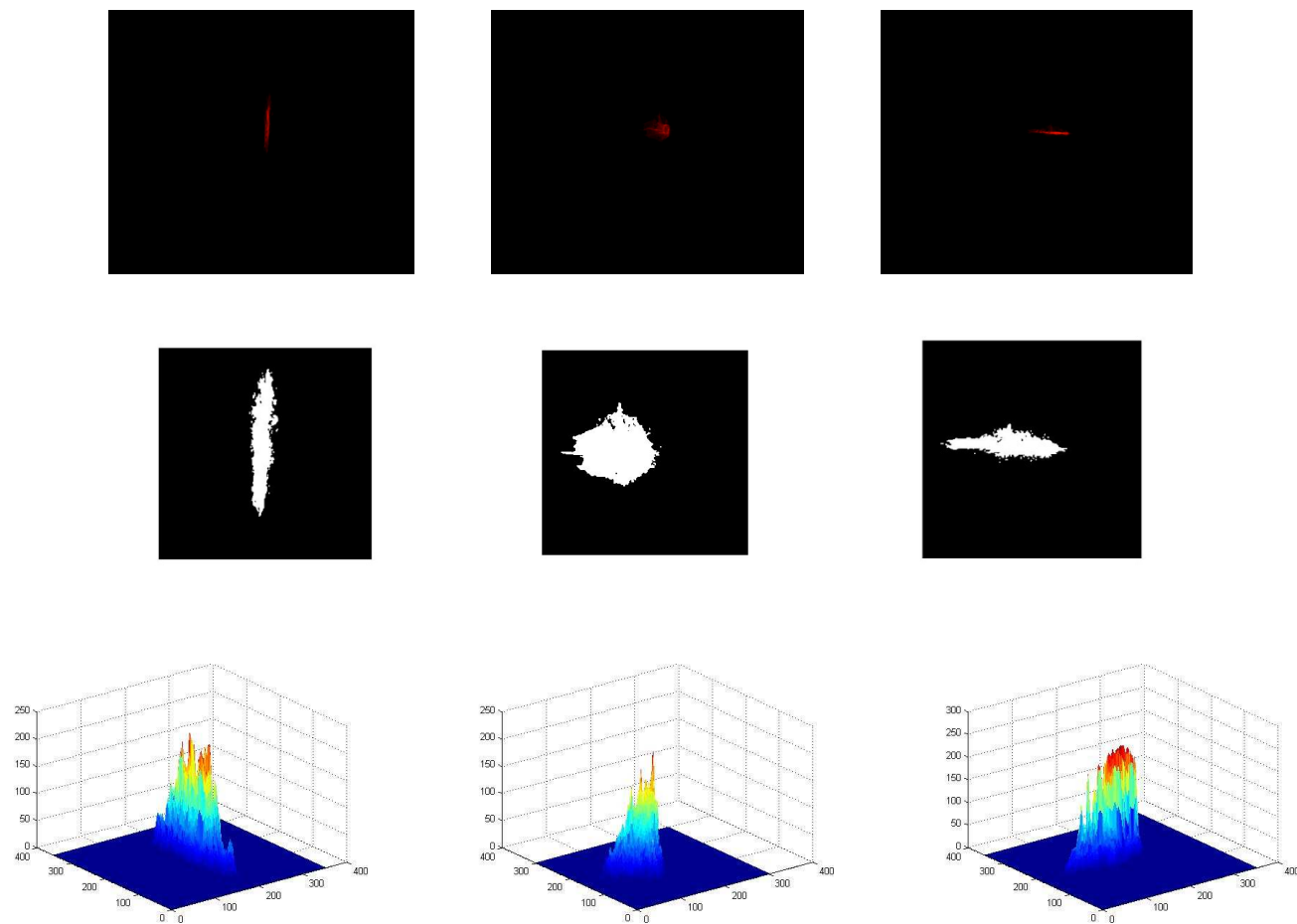


Fig A4.2. Evolución del astigmatismo: a) Plano focal vertical (69 mm), b) Círculo de mínima confusión (71 mm), c) Plano focal horizontal (74 mm)

ANEXO 4: IMÁGENES DE LAS ABERRACIONES EN LAS LH'S ESTUDIADAS

EVOLUCIÓN DEL ASTIGMATISMO: LH **SIMÉTRICA NEGATIVA** (Reconstrucción con 473 nm)

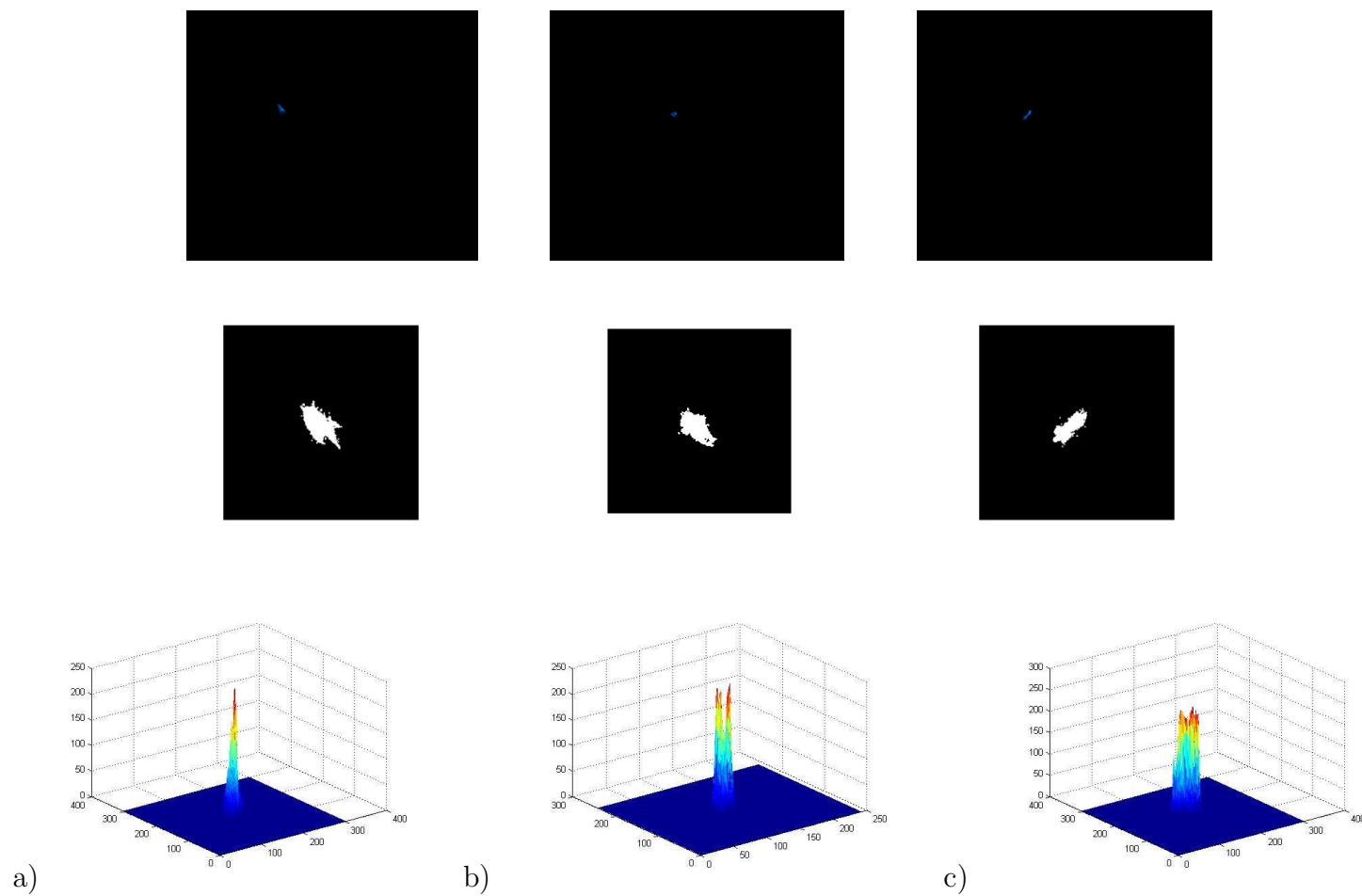


Fig A4.3. Evolución del astigmatismo: a) Plano focal vertical (92 mm), b) Círculo de mínima confusión (94 mm), c) Plano focal horizontal (97 mm)

ANEXO 4: IMÁGENES DE LAS ABERRACIONES EN LAS LH'S ESTUDIADAS

EVOLUCIÓN DEL COMA: LH ASIMÉTRICA POSITIVA (Reconstrucción con 473 nm)

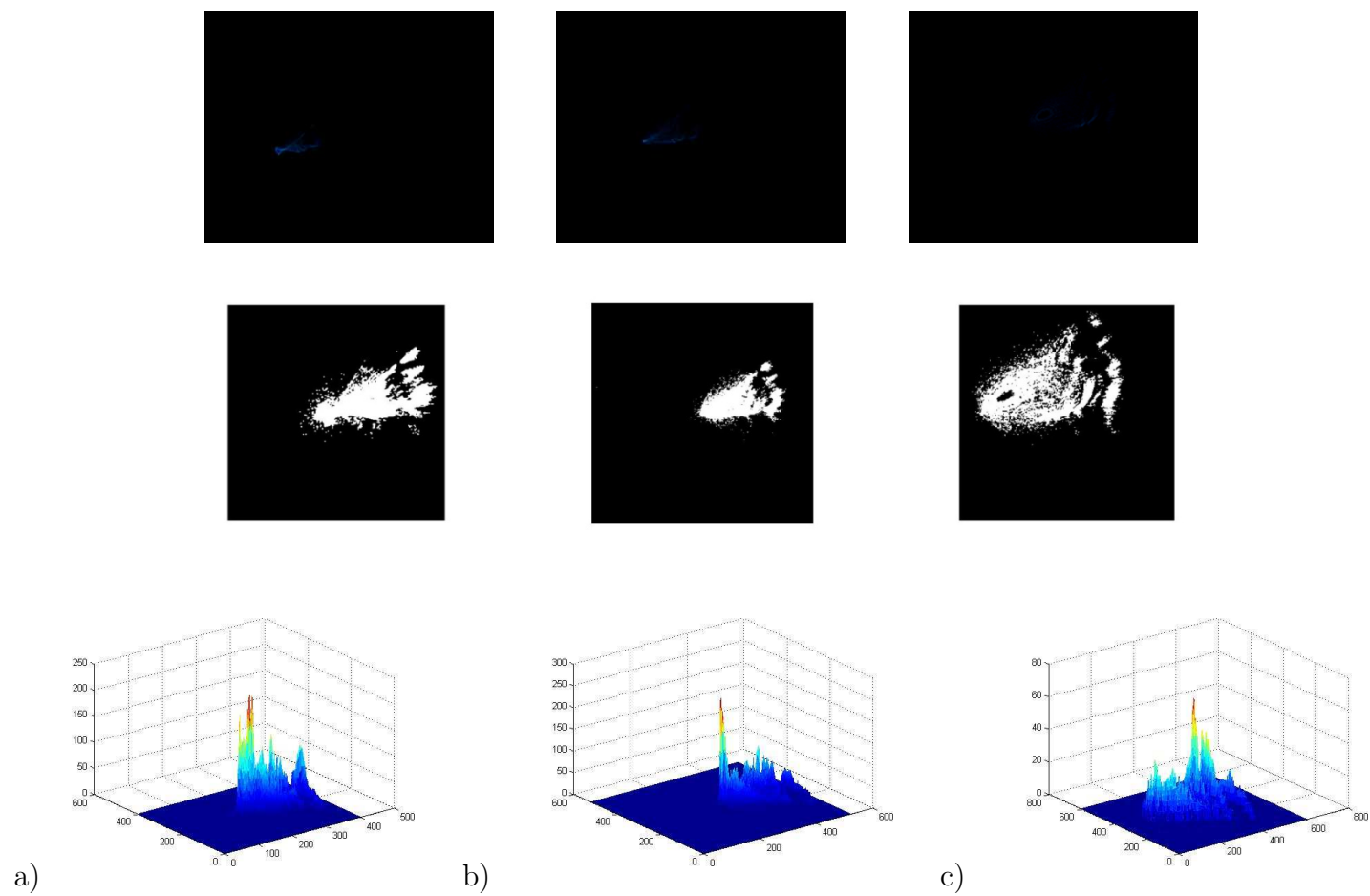


Fig A4.4 Evolución del coma: a) Plano (81 mm), b) Plano de "mejor imagen" (87 mm), c) Plano (93 mm)